

Устройство с вихретоковым преобразователем для контроля параметров вибрации

М. К. МАРКЕЛОВ, П. П. ЧУРАКОВ

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия,
e-mail: maxkoma@yandex.ru

Рассмотрено устройство для измерения относительной вибрации валов роторных машин. В качестве первичного преобразователя для измерения зазора используется параметрический вихретоковый преобразователь. Приведены результаты расчета характеристик устройства. Предложена измерительная схема, позволяющая скомпенсировать влияние начальных параметров датчика и соединительной линии.

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, виброперемещение, градуировочная характеристика.

The device for measurement of relative vibration of rotary engines shafts is considered. The parametric eddy current probe is used as a sensor for lift-off measurement. The results of calculation of device characteristics are presented. The measuring circuit allowing to compensate the influence of initial parameters of the sensor and connecting line is suggested.

Key words: vibration displacement, eddy current transformer, calibration curve.

Вихретоковый преобразователь (ВТП) состоит из одной или нескольких индуктивных обмоток, предназначенных для возбуждения в объекте контроля (ОК) вихревых токов и преобразования зависящего от параметров объекта электромагнитного (ЭМ) поля в выходной сигнал. Распределение плотности вихревых токов в проводящем объекте контроля определяется [1] источником ЭМ-поля, геометрическими и ЭМ-параметрами ОК, а также взаимным расположением ВТП и ОК. Для контроля и диагностики состояния вращающихся валов различных установок при помощи ВТП обеспечивают измерения относительной вибрации, частоты вращения, искривления вала ротора и других параметров [2]. Часто в качестве выходной величины используют составляющие комплексного полного сопротивления.

Измерительная цепь. Недостатком существующих ВТП являются значительные дополнительные погрешности из-за влияния параметров соединительной линии, емкостной

составляющей полного сопротивления и электрофизических свойств материала, из которого изготовлен ОК. Погрешности от влияния электрофизических свойств материала и параметров соединительной линии особенно существенны [3] при измерениях малых зазоров и изменяются в зависимости от индивидуальных свойств ОК. Значительная часть дополнительной погрешности носит аддитивный характер и может быть скомпенсирована построением специальной измерительной цепи (ИЦ) с использованием [4] операционных усилителей.

При измерении зазора информативной величиной будет вносимая индуктивность ВТП. Характер изменения вносимого комплексного сопротивления $Z_{\text{вн}}(h)$ при изменении зазора h можно определить при полном расчете параметрического накладного ВТП [5]. Полные индуктивность $L_{\text{д}}(h_0) = L + L_{\text{вн}}(h_0)$ и активное сопротивление $R_{\text{д}}(h_0) = R_{\text{п}} + R_{\text{вн}}(h_0)$

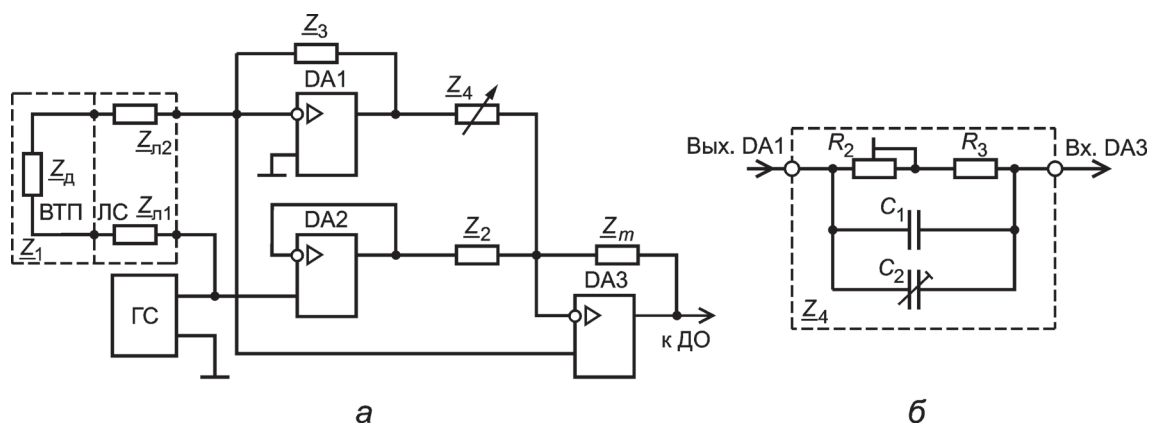


Рис. 1. Функциональная схема (а), поясняющая компенсацию параметров ЛС и первоначальных параметров ВТП, и электрическая принципиальная схема цепи компенсации параметров ЛС и ВТП (б):

ГС — генератор сигналов; DA1 — DA3 — операционные усилители; ДО — детектор огибающей

ВТП при начальном зазоре (первоначальные параметры ВТП) необходимо учитывать и компенсировать при настройке устройства. Кроме этого, предлагаемая электрическая схема позволяет компенсировать параметры линии связи.

В предлагаемом устройстве используется ИЦ в виде мостовой квазиуравновешенной схемы. На рис. 1, а приведена схема, которая поясняет принцип компенсации параметров сопротивлений $Z_{\text{л}}$ соединительной линии связи (ЛС) и ВТП

$Z_{\text{д}}(h_0) = Z_{\text{к.и}} + Z_{\text{вн}}(h_0)$, где $Z_{\text{к.и}}$ — собственное комплексное сопротивление катушки индуктивности. Это уравновешенная относительно выходной диагонали (инвертирующие входы операционных усилителей (ОУ) DA1 и DA3) мостовая схема, плечи которой составляют следующие элементы: первое плечо — ВТП и ЛС с комплексным сопротивлением $Z_1(h) = Z_{\text{д}}(h) + Z_{\text{ЛС}}$, где $Z_{\text{ЛС}} = Z_{\text{л1}} + Z_{\text{л2}}$; второе плечо — ОУ DA2 и комплексное сопротивление Z_2 ; третье плечо — ОУ DA1 и комплексное сопротивление Z_3 ; четвертое плечо — комплексное сопротивление Z_4 . При этом ОУ DA2 включен в режиме повторителя напряжения, обеспечивает согласование сопротивлений, предотвращает переход схемы в режим генерации и компенсирует запаздывание сигнала в цепи DA1.

Выходное напряжение ОУ DA1:

$$\dot{U}_{\text{DA1}}(h) = -\dot{U}_{\text{ГС}} Z_3 / (Z_{\text{д}}(h) + Z_{\text{ЛС}}), \quad (1)$$

где $\dot{U}_{\text{ГС}}(t)$ — комплексное напряжение синусоидального опорного сигнала с амплитудой U_0 , поступающее от генератора ГС.

Напряжение на выходе ОУ DA3:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{DA3}}(h) &= -\dot{U}_{\text{DA1}}(h) Z_m / Z_4 - \dot{U}_{\text{ГС}} Z_m / Z_2 = \\ &= -\dot{U}_{\text{ГС}} Z_m \left(Z_2^{-1} - Z_3 / [Z_4 (Z_{\text{д}}(h) + Z_{\text{ЛС}})] \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Для уравнивания схемы необходимо, чтобы $\dot{U}_{\text{DA3}}(h) = 0$, т. е.

$$Z_4 (Z_{\text{д}}(h) + Z_{\text{ЛС}}) - Z_2 Z_3 = 0. \quad (3)$$

Упростим процесс уравнивания, выбрав активными $Z_2 = R_4$, $Z_3 = R_1$, $Z_m = R_5$. Произведение $Z_2 Z_3 = R_4 R_1 = k$ имеет положительный знак, тогда $Z_4 (Z_{\text{д}}(h) + Z_{\text{ЛС}}) > 0$, т. е. параметры ЛС и датчика типа ВТП можно скомпенсировать только параллельной RC-цепью с переменными параметрами (см. рис. 1, б). Номинальные значения сосредоточенных элементов Z_4 , при которых будет происходить полное уравнивание, определяются из (3). При этом происходит компенсация не только собственных параметров

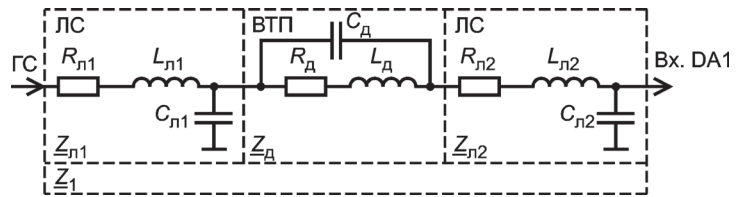


Рис. 2. Эквивалентная схема первого плеча мостовой схемы — ВТП и ЛС

ВТП (и их технологического разброса), но и параметров, вносимых ОК при начальном зазоре, что улучшает чувствительность устройства и позволяет применять его при исследовании валов из различных материалов. Компенсация параметров ЛС и ВТП выполняется при начальном зазоре, т. е. $Z_1(h_0) = Z_{\text{д}}(h_0) + Z_{\text{ЛС}} = (Z_{\text{к.и}} + Z_{\text{вн}}(h_0)) + Z_{\text{ЛС}}$. Изменение выходного напряжения ОУ DA3 пропорционально изменению зазора между ВТП и ОК.

В качестве ЛС выбран antivибрационный теплостойкий кабель с фторопластовой изоляцией марки АВКТ-3, предназначенный для соединения вибропреобразователей со входами измерительных устройств. Линия связи представляется цепью с распределенными параметрами — однородной двухпроводной линией с волновым сопротивлением [6]:

$$Z_{\text{л}} = \sqrt{(R_{\text{л}} + j\omega L_{\text{л}}) / (G_{\text{л}} + j\omega C_{\text{л}})},$$

где $R_{\text{л}}$ — активное продольное электрическое сопротивление постоянному току внутреннего проводника кабеля, $R_{\text{л}} \leq 1$ Ом при 20 °С; $L_{\text{л}}$ — индуктивность кабеля, она незначительна и ей можно пренебречь; $C_{\text{л}}$ — погонная электрическая емкость кабеля, близкая к нулю, $C_{\text{л}} = 110$ пФ/м; $G_{\text{л}}$ — активная поперечная проводимость изоляции кабеля, близкая к нулю.

Эквивалентная схема первого плеча мостовой схемы — ВТП и ЛС с сопротивлением Z_1 — представлена на рис. 2. Между ОК и ВТП введен произвольный зазор h . Считаем, что емкость ВТП в рабочем режиме не изменяется и равна собственной емкости катушки $C_{\text{д}} = C_0$.

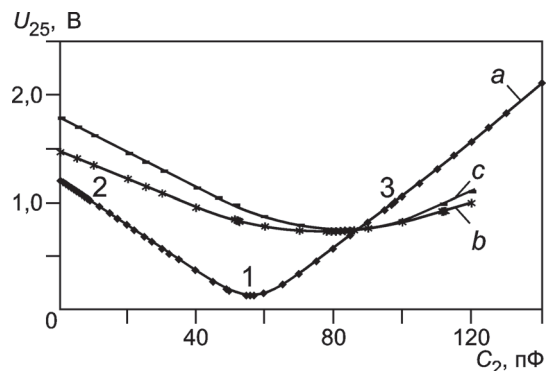


Рис. 3. Зависимости напряжения на выходе ДО от изменения емкости C_2 цепи компенсации:
а — без учета влияния ОК; b, c — с учетом ОК, полученные в результате расчета и моделирования

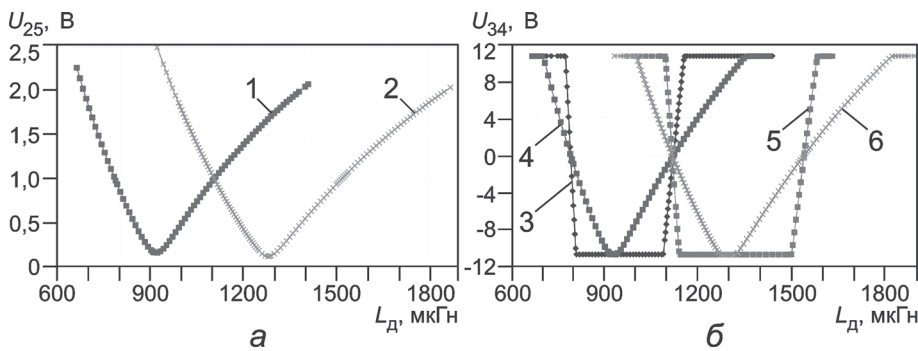


Рис. 4. Зависимости напряжения от изменения индуктивности датчика L_d на выходах ДО (а) и МУ (б):

1 — U_{25c} ; 2 — U_{25b} ; 3 — U_{34c1} ; 4 — U_{34c2} ; 5 — U_{34b1} ; 6 — U_{34b2}

Схема предварительной обработки сигнала с ИЦ. После компенсации влияния начальных параметров ВТП и ЛС в ИЦ под воздействием перемещения ОК изменяется комплексное сопротивление (а значит, и индуктивность) ВТП и появляется выходной сигнал, зависящий от h :

$$\Delta \dot{U}_{DA3}(h) = \frac{-\dot{U}_{ГС} Z_m Z_3}{Z_{ВН}(h) Z_4} = \frac{-\dot{U}_{ГС} R_5 R_1}{Z_{ВН}(h) Z_4}.$$

Осуществляется амплитудная модуляция, огибающая модулированного сигнала несет информацию об изменении зазора между ВТП и ОК. Для выделения амплитуды вибрации используется схема предварительной обработки сигнала ИЦ, состоящая из последовательно включенных детектора огибающей (ДО), суммирующего (СУ) и масштабирующего (МУ) усилителей.

С выхода ДО сигнал огибающей поступает на суммирующий усилитель, в котором для расширения динамического диапазона прибора происходит вычитание постоянной составляющей сигнала. Далее сигнал приходит на вход МУ, в

котором предусмотрена плавная регулировка усиления для задания крутизны преобразования. С выхода МУ сигнал подается на вольтметр для измерения амплитуды либо на осциллограф или анализатор спектра.

В устройстве контроля сигнал с выхода МУ поступает на двухполупериодный пиковый детектор, постоянное напряжение на выходе которого соответствует размаху биений вала. С выходов пикового детектора и МУ сигналы подаются на микроконтроллерный блок для измерений напряжения и частоты, которые определяют интенсивность и частоту вибрации.

Результаты моделирования, расчета и эксперимента. Проведено моделирование работы принципиальной электрической

схемы ИЦ совместно со схемой предварительной обработки сигнала в программе схемотехнического моделирования PSpice OrCAD 9.1 [7]. В реальном ВТП собственная индуктивность катушки $L \approx 1590$ мкГн, активное сопротивление на постоянном токе $R_{\sim} \approx 49$ Ом, активное сопротивление на переменном токе $R_{\sim} \approx 75$ Ом и частота тока возбуждения $f = 454$ кГц. Начальный зазор ВТП $h_0 = 1200$ мкм.

Укажем некоторые обозначения, используемые для моделирования в программе PSpice [7]:

$u_{25}(t)$ — мгновенное значение напряжения на выходе ДО (на первом входе СУ). При статических измерениях оно равно установившемуся значению постоянной составляющей U_{25} ;

$U_{28} = U_{оп}$ — постоянное опорное напряжение на втором входе СУ;

$u_{31}(t)$ — мгновенное значение напряжения на выходе СУ (на входе МУ). При статических измерениях оно равно установившемуся значению постоянной составляющей U_{31} ;

$u_{34}(t)$ — мгновенное значение напряжения на выходе МУ (на входе схемы вторичной обработки). При статических измерениях оно равно установившемуся значению постоянной составляющей U_{34} .

Первоначально моделирование проводили без учета влияния ОК на сигнал ВТП. Основные зависимости получены только при изменении полной индуктивности ВТП в обе стороны от индуктивности при начальном зазоре. Изменением активного сопротивления ВТП пренебрегаем. Опорное напряжение $U_{28} = U_{оп} = -5,236$ В при напряжении $U_{25} \approx 1$ В на выходе ДО в режиме калибровки.

Изменяя емкость конденсатора C_2 , задаем рабочую точку ИЦ. На рис. 3 представлены зависимости напряжения на выходе ДО от изменения емкости C_2 цепи компенсации, которые построены при сопротивлении R_2 , соответствующем наилучшему уравновешиванию мостовой схемы ИЦ. Они построены по (3) с учетом (2) и состоят из двух ветвей: спадающей — от начальной емкости C_2 до ее значения при наилучшем уравновешивании и возрастающей — до конечных значений емкости. На примере зависимости а показаны три важные точки:

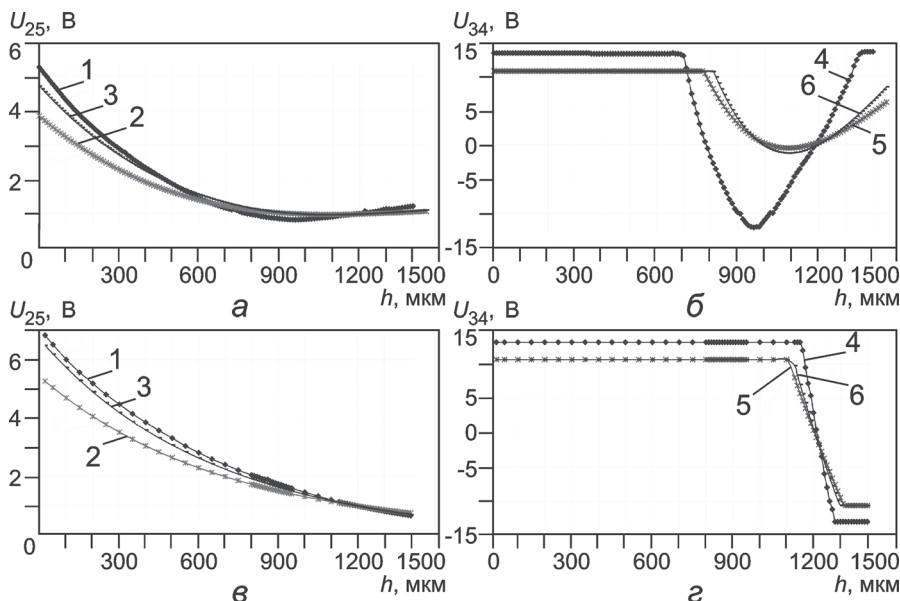


Рис. 5. Выходные сигналы для первой (а, б) и второй (в, г) рабочих точек соответственно на выходах ДО (а, в) и МУ (б, г) при эксперименте, расчете и моделировании:

1 — U_{25a} ; 2 — U_{25p} ; 3 — U_{25m} ; 4 — U_{34a} ; 5 — U_{34p} ; 6 — U_{34m}

1 — наилучшего уравнивания мостовой схемы ИЦ и компенсации параметров ВТП и ЛС, $C_2 = 56$ пФ; 2 — первая рабочая точка, находящаяся на спадающей ветви балансирующей характеристики, напряжение на выходе ДО или соответственно на первом входе СУ составляет $U_{25} \approx 1$ В, $C_{25} = 10$ пФ; 3 — вторая рабочая точка, находящаяся на возрастающей ветви балансирующей характеристики, для которой $U_{25} \approx 1$ В, $C_2 = 98$ пФ.

На рис. 4 представлены зависимости напряжения на выходах ДО и МУ от изменения индуктивности ВТП L_d при сопротивлении R_2 цепи компенсации для наилучшего уравнивания мостовой схемы ИЦ. Данные зависимости являются градуировочными характеристиками без учета и с учетом схемы предварительной обработки сигнала ИЦ. На них также можно выделить две ветви. Характеристики U_{25c} , U_{34c1} , U_{34c2} для первой рабочей точки (см. рис. 3, т. 2), расположенной на спадающей ветви балансирующей характеристики со значением емкости $C_2 = 10$ пФ, а характеристики U_{25b} , U_{34b1} , U_{34b2} для второй рабочей точки (см. рис. 3, т. 3), находящейся на возрастающей ветви со значением емкости $C_2 = 98$ пФ. Характеристики для МУ даны для двух значений крутизны: U_{34c1} , U_{34b1} — для максимальной и U_{34c2} , U_{34b2} — для минимальной крутизны.

Как следует из рис. 4 при настройке ИЦ на симметричные рабочие точки на разных ветвях характеристики зависимость смещается приблизительно на 360 мкГн в данном случае и почти симметрично относительно индуктивности ВТП при начальном зазоре. Это примерно соответствует диапазону уравнивания полной индуктивности $L_d(h) = L + L_{вн}(h)$ ВТП при выбранных номинальных значениях емкости C_2 .

В дальнейшем проведены расчет и моделирование схемы устройства с учетом полученных ранее [5] зависимостей полной индуктивности и полного активного сопротивления катушки индуктивности ВТП от зазора, т. е. с учетом вносимых ОК индуктивности и активного сопротивления. Для проверки теории были получены экспериментальные результаты при аналогичных параметрах. Исходные данные для расчета и моделирования: объект контроля — сплав ВКЗ (вольфрамкобальтовый, 3 % кобальта, $\mu_r = 10$ и $\sigma = 5,051 \cdot 10^6$ См/м при температуре 20 °С); максимальное усиление МУ (максимальная крутизна характеристики) $K_{МУ} = 7,5$; $R_2 = 100$ Ом, $U_{28} = U_{оп} \approx -5$ В; напряжение на выходе ДО в режиме регулирования $U_{25} = 0,97$ В для спадающей ветви и $U_{25} = 0,977$ В для возрастающей ветви характеристики уравнивания.

При проведении эксперимента использовали микрометр с погрешностью 0,01 мм и подвижной пяткой в качестве ОК; универсальный вольтметр В7-26. На рис. 3 для кривых в, с, как было показано ранее для кривой а, можно выделить три важные точки: точку с максимальной компенсацией параметров ВТП и ЛС соответственно по характеристикам расчетной ($C_2 = 78,02$ пФ) и после моделирования ($C_2 = 82,5$ пФ); первую рабочую точку ($C_2 = 39,7$ и 51,0 пФ); вторую рабочую точку ($C_2 = 117,6$ и 111,9 пФ). Выходные напряжения ДО для этих рабочих точек представлены соответственно на рис. 5, а и в. Рабочие характеристики преобразования на

выходе МУ для первой и второй рабочих точек приведены соответственно на рис. 5, б и г. Зависимости даны для значения R_2 при наилучшем уравнивании мостовой схемы ИЦ.

На рис. 5 можно заметить, что экспериментальные и полученные путем моделирования характеристики зависимости напряжения на выходе ДО от зазора h практически совпадают. Отклонение можно объяснить технологическим разбросом элементов схемы и небольшим отличием реальных электромагнитных параметров ОК от принятых при расчетах. Отличие от расчетных значений напряжения на выходе ДО объясняется упрощением математической модели схемы, в которой не учитываются параметры макромоделей. Для первой рабочей точки, находящейся на спадающей ветви балансирующей характеристики, напряжение на выходе МУ при начальном зазоре имеет резко выраженную нелинейность. Это проявление нелинейности характеристики моста переменного тока, а также увеличения нелинейности зависимости вносимых параметров ОК при больших зазорах. Вследствие этого при работе следует использовать именно спадающий участок характеристики преобразования на выходе МУ при настройке на вторую рабочую точку.

Закключение. Предложенная мостовая измерительная цепь позволяет существенно снизить погрешности от влияния электрофизических свойств материала ОК и параметров соединительных линий, что дает возможность использовать рассмотренное измерительное устройство в телеизмерительных системах при значительном удалении накладного вихретокового преобразователя. Расчет параметров и результаты моделирования в системе OrCAD подтверждены результатами эксперимента.

Л и т е р а т у р а

1. **Неразрушающий контроль:** Справочник: В 7 т./Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2. В 2 кн. Кн. 1. Контроль герметичности. Кн. 2. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2003.
2. **Неразрушающий контроль:** Справочник. В 7 т./Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7. В 2 кн. Кн. 1: Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии; Кн. 2: Балицкий Ф. Я. и др. Вибродиагностика. М.: Машиностроение, 2005.
3. **Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е.** Методы и приборы электромагнитного контроля / Под ред. В. Е. Шатерникова. М.: Издат. дом. «Спектр», 2010.
4. **Пат. 2319110 РФ.** Устройство подключения параметрических датчиков / П. П. Чураков и др. // Открытия. Изобретения. 2008. № 7.
5. **Маркелов М. К.** Разработка вихретокового преобразователя для измерения зазора // Надежность и качество: Труды Междунар. симп.: Пенза: Информ.-издат. центр ПензГУ. 2011. Т. 2. С. 270—273.
6. **Атабеков Г. И.** Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969.
7. **Разевиг В. Д.** Система проектирования OrCAD 9.2. М.: СОЛОН-Р, 2001.

Дата принятия 23.01.2013 г.