

2. Die Wiederherstellung des Magnetfeldes der Elektromaschinen mit Permanentmagneten / W. Kutscherjawanenko, L. Pisarik, G. Gulkov, R. Schaibi, L. Kutscherjawanenko // 37 Internationaleswissenschaftliches Kolloquium 21.09-24.09.1992. Band 1. — Ilmenau. — S. 408—413.

3. Фридман Б. Э. Переходные процессы при программируемом разряде емкостного накопителя энергии // Электричество. — 1989. — № 12. — С. 36—41.

4. Миловоров В. П. Электромагнитные устройства автоматики. — М.: Высш. шк., 1983. — 408 с.

5. Кулон Ж. - Л., Сабоннадьер Ж. - К. САПР в электротехнике: Пер. с франц. — М.: Мир, 1988. — 204 с.

6. Восстановление характеристик высокомоментных электродвигателей / В. Ф. Кучерявенко, Л. С. Писарик, Шаби Рашид, Д. В. Сахаров // Совершенствование существующих и создание новых ресурсосберегающих технологий: Тез. докл. РНТК, 4 февраля 1991 г. — Могилев, 1991. — 101 с.

Представлена кафедрой
ЭАПУ и ТК

Поступила 26.04.2000

УДК 621.327

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЬЕЗОЭФФЕКТА

Канд. техн. наук ЗУБЦОВ В. И.

Полоцкий государственный университет

Изучение напряженного состояния конструкционных материалов, нелинейно-упруго работающих под нагрузкой, и самих конструкций имеет большое значение как для предсказания поведения их в условиях длительного нагружения, так и для анализа структурных изменений физико-химического или технологического процессов.

Для этой цели могут быть использованы пьезоэлектрические преобразователи контроля напряженного состояния материалов, которые относятся к приборам, выполняющим электрические измерения. В их основе лежит преобразование механической энергии внутренних напряжений контролируемого материала в энергию электрического сигнала.

Функциональная схема таких пьезопреобразователей может быть изображена в виде двух пьезоэлементов (рис. 1): первый нижний возбуждается электрическим способом и вынуждает колебаться верхний, который возбуждается измеряемой компонентой механического напряжения [1—6].

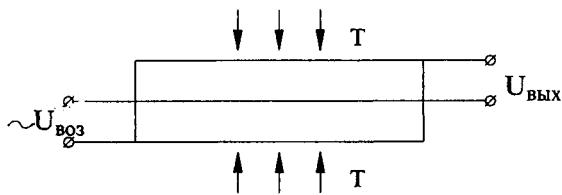


Рис. 1. T – механическое напряжение (входная величина преобразователя); $\sim U_{\text{воз}}$ – возбуждающее электрическое напряжение; $U_{\text{вых}}$ – выходное электрическое напряжение (выходная величина преобразователя)

Эти процессы описываются уравнениями пьезоэффекта:

$$P_i = d_{ij}T_j;$$

$$S_j = d_{ij}E_i,$$

где P , S – соответственно поляризация и деформация;

T – механическое напряжение;

E – напряженность электрического поля;

ij – индексы; $i = 1-3$; $j = 1-6$;

d – пьезомодуль;

t – транспонирование матрицы.

Первое выражение системы уравнений характеризует работу пьезоэлемента, возбуждаемого механическим напряжением, второе – работу пьезоэлемента, возбуждаемого электрическим полем.

Нижний пьезоэлемент возбуждается электрическим полем и вынуждает колебаться верхний, который возбуждается измеряемой компонентой механического напряжения.

На рис. 2 приведена конструктивная схема преобразователя механических напряжений. Устройство содержит корпус 1, кольцевой пьезоэлемент 2, цилиндрический пьезоэлемент 3, токовыводы 6, 7, 8, подсоединенные к контактным площадкам 4, 5 и нижней поверхности цилиндрического пьезоэлемента. К поверхностям кольцевого пьезоэлемента также подсоединены два токовывода (на рисунке не показаны).

Цилиндрический пьезоэлемент изготовлен монолитным, а на его верхней поверхности выполнены две контактные площадки – кольцевая и в виде круга, изолированные одна от другой диэлектрическим промежутком. Контактные площадки размещены концентрично, причем наружный диаметр кольцевой площадки равен диаметру цилиндрического пьезоэлемента. Радиусы контактных площадок выбраны из соотношения

$$R_{\text{кольца}} / r_{\text{круга}} = 1,50-1,60.$$

Изготовление цилиндрического пьезоэлемента монолитным, по принципу пьезотрансформатора, упрощает конструкцию и повышает чувствительность устройства. Выполнение контактных площадок указанной выше формы и радиусов также обеспечивает повышение чувств-

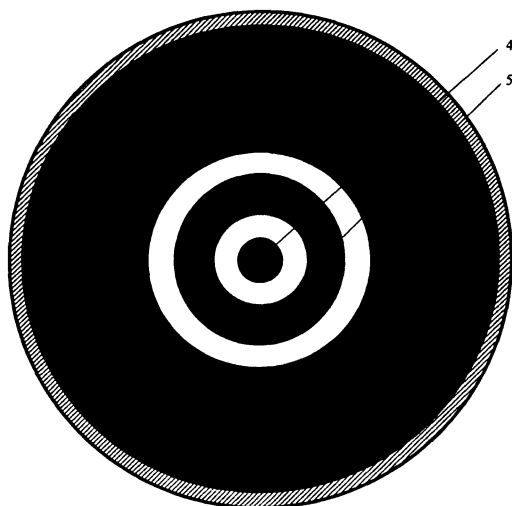
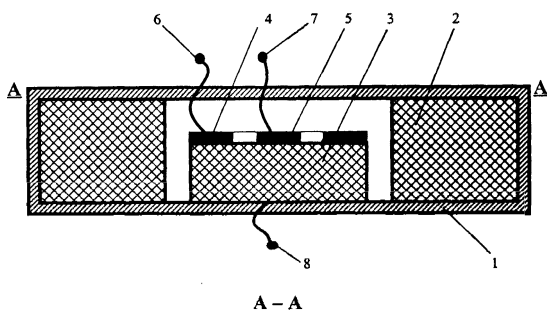


Рис. 2

вительности, так как контакты для возбуждения и съема выходного сигнала объединены одним пьезоэлементом. Благодаря этому по принципу суперпозиции волн результирующая амплитуды упругих механических колебаний в пьезоэлементе равна сумме амплитуд колебаний, образованных обратным пьезоэффектом в результате подвода возбуждающего напряжения к кольцевой контактной площадке и прямым пьезоэффектом в результате действия измеряемых механических напряжений. Выходной сигнал, полученный под действием результирующей (суммарной) амплитуды механических колебаний, снимается с контактной площадки в виде круга. Указанное соотношение радиусов кольцевой контактной площадки и площадки в виде круга получено экспериментальным путем. Причем электрическое напряжение возбуждения подводится к кольцевой контактной площадке, а выходной сигнал снимается с контактной площадки в виде круга.

В момент изготовления изделия преобразователь помещают внутри незатвердевшей среды (пластмассы, стеклопластики, бетона и т. д.).

При воздействии механических напряжений на корпус преобразователя кольцевой пьезоэлемент сжимается, колебания пьезоэлемента 3 становятся ограниченными, в результате чего появляется электрический сигнал, пропорциональный этому измеряемому механическому напряжению.

Величины зазора между верхней поверхностью цилиндрического пьезоэлемента и корпуса выбраны из соотношения

$$\delta_{\text{кол}} - \delta_{\text{цил}} = dUK,$$

где $\delta_{\text{кол}}$ — толщина кольцевого элемента;

$\delta_{\text{цил}}$ — то же, цилиндрического элемента;

d — пьезоэлектрическая постоянная пьезоматериала;

U — электрическое напряжение;

K — коэффициент формы электрического напряжения [8].

Величины U и K принимают значения в зависимости от того, каким электрическим напряжением — аналоговым синусоидальным или импульсным — возбуждается цилиндрический пьезоэлемент. Так, при возбуждении синусоидальным аналоговым напряжением U — среднеквадратичное синусоидальное напряжение (шкалы аналоговых вольтметров принято градуировать в значениях среднеквадратичного синусоидального напряжения), а $K = 1$, так как измерение прямое, т. е. U считывается непосредственно с вольтметра. При возбуждении импульсным напряжением U — амплитудное (максимальное) напряжение U_{max} , в значениях которого градуируют шкалы импульсных вольтметров.

Коэффициент K принимает значения в зависимости от форм импульсного напряжения и является справочной величиной. В данном случае измерение косвенное, так как напряжение, считанное с импульсного вольтметра, умножается на K ($U_{\text{max}} K$). Это объясняется тем, что амплитуда импульса не может быть однозначно определена из-за многообразия форм. Поэтому его принято определять обобщенным амплитудным напряжением, характеризующимся с точки зрения энергии импульса (отношением энергии импульса к количеству его электричества) [8]. Это достигается путем введения коэффициента формы импульсного напряжения K .

Таким образом, при возбуждении синусоидальным аналоговым напряжением соотношение для зазора принимает вид

$$\delta_{\text{кол}} - \delta_{\text{цил}} = dU,$$

где U — среднеквадратичное значение напряжения.

При возбуждении импульсным напряжением

$$\delta_{\text{кол}} - \delta_{\text{цил}} = dUK,$$

где U — максимальное значение импульсного напряжения;

K — коэффициент формы.

Путем подачи постоянного электрического напряжения по токовым водам к кольцевому пьезоэлементу можно изменять диапазон и точность измерения механических напряжений.

Выполнение контактных площадок форм и в виде круга с соотношением

$$R_{\text{кольца}}/r_{\text{круга}} = 1,50-1,60$$

позволяет получить самое высокое электрическое выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ в зависимости от действующих механических напряжений.

На рис. 3 приведен график зависимости $U_{\text{вых}}$ от величины механического напряжения T (тензочувствительности) для цилиндрического пьезоэлемента из пьезокерамики ЦТС-19 размером 10×1 мм для разных соотношений $R_{\text{кольца}}/r_{\text{круга}}$.

Пьезопреобразователи были применены для анализа напряженного состояния в материалах, предназначенных для изготовления металло-

пластовых конструкций на основе полиолефинов. При этом преобразователи помещались внутрь контролируемого материала при помощи специально изготовленного нагревательного устройства [6].

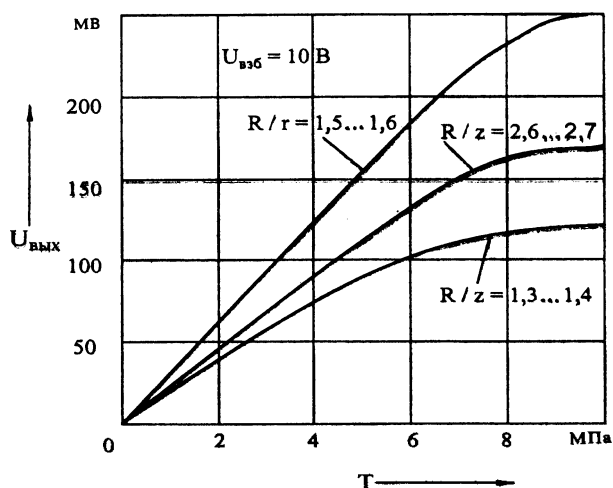


Рис. 3

Аналізу подвергались три марки композиционных составов полиэтиленов высокого давления (ПЭВД), наиболее подходящих для изготовления труб по своим физико-механическим свойствам (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов

Номер композиции состава	27	28	29
Состав, %	ПЭВД – 85 Стекловолокно – 10 Тальк – 5	ПЭВД – 85 Стекловолокно – 15	ПЭВД – 90 Стекловолокно – 10
Плотность, г/см ³	1,0378	1,0401	1,0387

Исследование прочностных характеристик полимерных и других конструкционных материалов (бетон, асфальтобетон, стеклопластики, смолы и т. п.) необходимо производить, по крайней мере, при температурах: -50 ; $+20$ и 100 °C и по возможности при высокой температуре (200 °C) [9–11].

Проведена экспериментальная проверка работоспособности преобразователей в условиях действия температуры в диапазоне $20 \dots 200$ °C и низких температур в диапазоне $20 \dots -196$ °C. Для измерения механических напряжений в композиционных материалах при высоких температурах были разработаны пьезоэлектрические преобразователи на основе кварца АТ-среза и по схеме пьезотрансформатора [12]. Применение АТ-среза объясняется его высокой термостабильностью по сравнению

с другими срезами кварца и, тем более, с пьезокерамикой. На рис. 4 показана тензочувствительность S_R преобразователей механических напряжений на основе кварца. Она значительно меньше, чем у таких же преобразователей на основе пьезокерамики ЦТС-19, 21 [6].

Поэтому для повышения чувствительности пьезоэлектрические преобразователи механических напряжений на основе кварца возбуждались электрическим напряжением $U_B = 60$ В. При этом частота возбуждающего напряжения f равнялась 2000 Гц.

Представление о том, как изменяется выходной сигнал преобразователя под действием температуры в диапазоне 20...200 °С без механической нагрузки, что в данном случае является мешающим фактором, дает рис. 5. Причем эксперименты проводились тремя циклами, и каждый раз указанная зависимость воспроизводилась. Из этого можно сделать

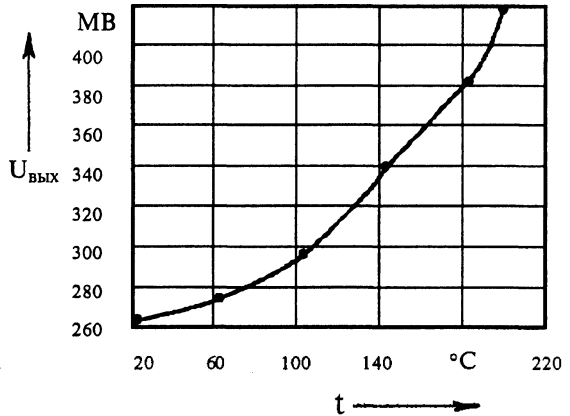
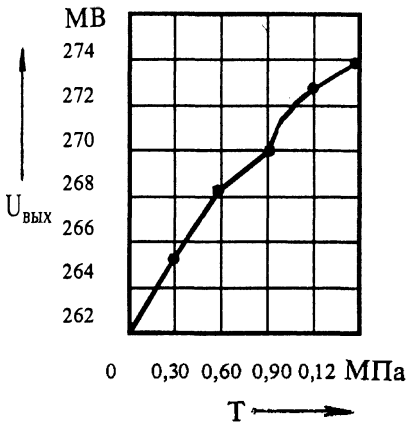


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала преобразователя от механической нагрузки при $t = 20$ °С

Рис. 5. Зависимость выходного сигнала преобразователя от температуры (без механической нагрузки)

вывод о хорошей повторяемости результатов и отсутствии температурного гистерезиса преобразователей на основе кварца. Изменение чувствительности преобразователя в диапазоне температур 20...200 °С в первом цикле нестабильно, так как происходит полимеризация клеевой композиции (рис. 6). Исследования, проведенные ранее, показывают, что небольшое увеличение $U_{\text{возб}}$ ведет к значительному росту $U_{\text{вых}}$ в пьезопреобразователях [2, 6]. Следовательно, нежелательное изменение чувствительности преобразователя под действием температуры

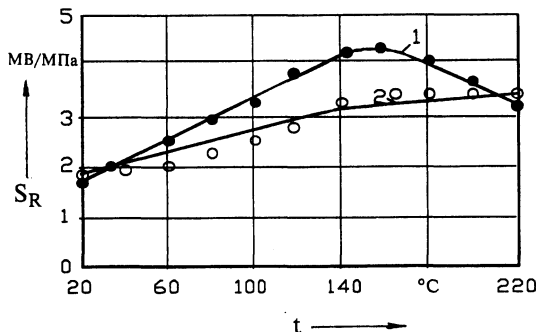


Рис. 6. Зависимость чувствительности преобразователя от температуры ($T = 1$ МПа): 1 — первый; 2 — второй циклы испытаний

(рис. 6, кривая 2), может быть скомпенсировано изменением $U_{\text{возб}}$. Управлять $U_{\text{возб}}$ можно путем введения термозависимого элемента в электрическую цепь возбуждения (рис. 7) [10]. Таким образом, изменение (уменьшение) чувствительности преобразователя механических напряжений от температуры будет происходить под действием изменения $U_{\text{возб}}$ в соответствии с варьированием сопротивления термозависимого элемента под действием той же температуры (рис. 8).

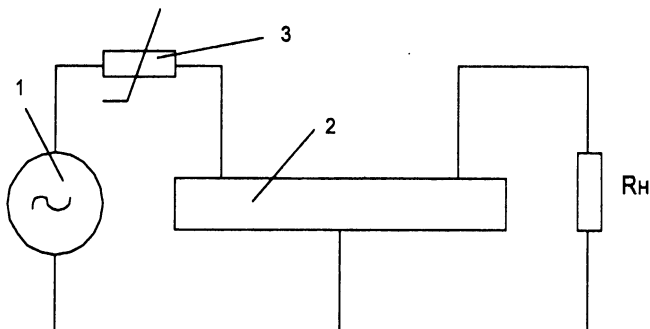


Рис. 7. Схема включения преобразователя, позволяющая скомпенсировать повышение его чувствительности от температуры: 1 – генератор, возбуждающий датчик; 2 – преобразователь; 3 – термозависимый элемент; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки

Из рис. 8 (кривая 2), видно, что применение термозависимого элемента, а также кварца АТ-среза в качестве чувствительного элемента преобразователя механических напряжений дает хорошие результаты для использования этих преобразователей при анализе напряженного состояния конструкционных материалов в диапазоне температур 20...200 °С.

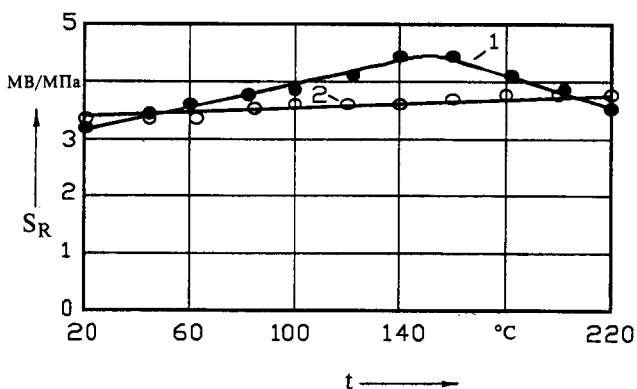


Рис. 8. Зависимость чувствительности преобразователя от температуры при включении его по схеме рис. 7

Проведена также экспериментальная проверка способности устройства измерять механические напряжения при действии низких (-196 °С) температур. Такие измерения необходимы при установлении температурной зависимости процессов разрушения конструкционных

материалов, например полимерных [9], для выработки методики применения материалов, используемых в различных изделиях, которые должны работать в условиях глубокого холода и др.

Для исследования выходной характеристики устройства в условиях действия температуры $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура жидкого азота) было изготовлено устройство с чувствительным элементом на основе ниобата лития и по схеме пьезотрансформатора (рис. 2).

Для охлаждения устройства использовалась камера из пенопласта, в которую после заполнения жидким азотом помещалось устройство, выдерживаемое в ней 10 минут. Затем проводилось нагружение по схеме рис. 9.

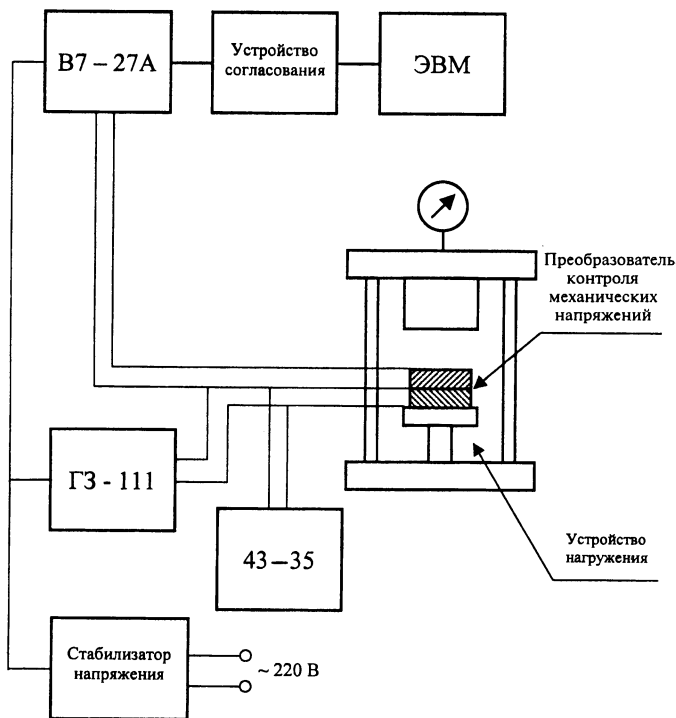


Рис 9. Схема установки для нагружения преобразователя контроля механических напряжений: В7-27 – модель вольтметра; ГЗ-111 – модель звукового генератора; ЧЗ-35 – модель частотомера

Эксперименты проводились при напряжениях 10; 15; 20; 25 В с частотой 2 кГц. Результаты, полученные при охлаждении устройства и при комнатной температуре, приведены на рис. 10. Из рисунка видно, что кривые зависимостей выходного сигнала устройства при $t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при $t = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически совпадают, из чего следует, что данное устройство может быть использовано при низкотемпературном контроле напряженного состояния.

Электрические преобразователи могут применяться как в научных, так и в практических целях, связанных с контролем напряженного состояния конструкционных материалов и самих конструкций в широком диапазоне температур ($-196 \dots +200$) $^{\circ}\text{C}$.

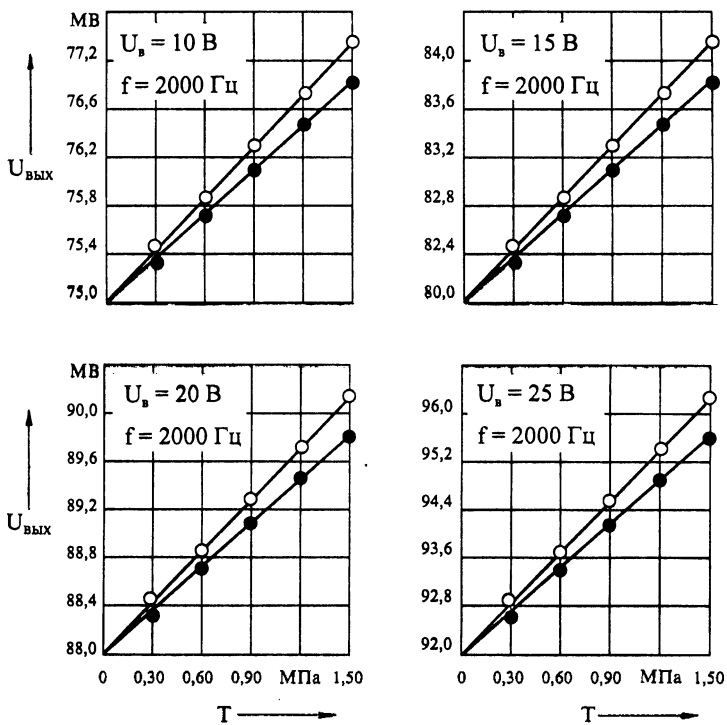


Рис. 10. Выходные характеристики устройства при разных напряжениях возбуждения $U_{\text{в}}$ и частоте 2000 Гц: —●— при температуре минус 196°C ; —○— плюс 20°C

ЛИТЕРАТУРА

- Зубцов В. И., Фомица Л. Н. Использование пьезопреобразователей для измерения постоянных механических напряжений в твердых сплошных средах // Приборы и системы управления. — 1985. — № 12. — С. 41–43.
- Фомица Л. Н., Зубцов В. И. Новые пьезопреобразователи для измерения напряженного состояния внутри твердого деформируемого тела // Использование физических методов в неразрушающих методах и контроле: Тез. докл. всесоюз. науч. конф. — Хабаровск, 1987.
- А. С. 94.5687 (СССР). Устройство для измерения постоянных и медленно меняющихся механических напряжений / Л. Н. Фомица, В. И. Зубцов // Открытия. Изобретения. — 1982. — № 3. — С. 211.
- А. С. 1064165 (СССР). Устройство для измерения нормальных механических напряжений / В. Я. Гришин, Л. Н. Фомица, В. И. Зубцов // Открытия. Изобретения. — 1983. — № 8. — С. 185.
- А. С. 1428952 (СССР). Преобразователь механических напряжений / В. И. Зубцов и др. // Открытия. Изобретения. — 1982. — № 22. — С. 289.
- Зубцов В. И. Пьезоэлектрический контроль прочности. — Полоцк: Полоцкий государственный университет. — 147 с.
- Устройство для измерения механических напряжений / В. И. Зубцов, М. М. Юрцевич // Оpubл. Б.Н. № 12, 1997.
- Елизаров А. С. Электрорадиоизмерения. — Мн.: Вышэйшая школа, 1986. — 320 с.
- Гуль В. Е., Кулезнев В. Н. Структура и механические свойства полимеров. — М.: Высш. школа, 1986. — 314 с.
- Зубцов В. И., Василенко В. С. Методы и средства контроля параметров для описания реологических свойств полимеров // Междунар. науч. конф. — Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: Гродно, 1996.
- Функциональный анализ напряженного состояния сплошных нелинейно-упругих сред / В. И. Зубцов, М. М. Юрцевич // Тез. докл. междунар. науч. конф.
- Патент № 2054 РБ. Устройство для измерения постоянных или медленно изменяющихся механических напряжений / В. И. Зубцов, М. М. Юрцевич, А. С. Селиханов // Открытия. Изобретения. — 1998. — № 3. — С. 89.