

ИЗМЕРЕНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПОЛИКАРБОНАТА АВТОГЕНЕРАТОРНЫМ МЕТОДОМ

Е.А. Бобина, С.А. Карандашов

Казанский научный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. В статье рассматривается автогенераторный метод измерения пьезонапряжения поликарбоната. Показано, что диапазон частот автогенераторов, используемых для измерения пьезонапряжения, лежит в пределах $4\div 9$ МГц. Проведены экспериментальные исследования, направленные на подтверждение правильности моделирования. Показано, что для контроля предела прочности поликарбоната достаточно стабильности частоты опорного и измерительного автогенераторов $\sim 10^{-2}$.

Ключевые слова: автогенераторный метод, пьезоэлектрический эффект, поликарбонат, измерение пьезонапряжения.

Введение

Снижение предела прочности поликарбоната обусловлено процессами деградации полимера в процессе его эксплуатации. Основными причинами деградации являются: воздействие ультрафиолетового и солнечного излучения, циклические ветровые и снеговые нагрузки, перепады температуры, а также градиент температуры, возникающий с противоположных сторон стекла [1–3]. Скорость деградации поликарбоната зависит от совокупности и интенсивности действующих факторов. Последнее фактически невозможно учесть при оценке ресурса таких полимеров. В связи с этим актуальной является задача контроля изменения предела прочности поликарбоната в процессе их эксплуатации.

В настоящее время различают несколько основных методов контроля предела прочности монолитных полимерных стекол: оптические методы, измерение механических напряжений с использованием тензорных датчиков, ультразвуковые методы, рентгеновский метод и ряд других [4]. Наиболее целесообразный метод контроля изменения предела прочности монолитных полимерных стекол основан на измерении пьезонапряжения, возникающего в полиарном полимере при механических воздействиях на него [4, 5]. Механизм пьезоэлектрического эффекта в полимерных стеклах связан с поляризацией макромолекул, возникающей при изменении их взаимного расположения, например, в результате внешних механических воздействий [6, 7]. Причем величина пьезонапряжения связана со структурой материала. Изменения в структуре, например, начало трещинообразования, проявляются в уменьшении значения пьезонапряжения, типового для данной механической нагрузки при заданной геометрии и материале полимера. Выбор схемной реализации измерения пьезонапряжения основан на выполнении специфичных требований, обусловленных условиями эксплуатации: динамический диапазон $\sim 60\div 70$ дБ, помехозащищенность, погрешность измерений не более 10% и ряд других [4, 6]. Использование амплитудных методов измерения, например, с использованием вольтметров требует высоких входных сопротивлений и отсутствие входных квазипостоянных измерительных токов, приводящих к изменению заряда емкости измерительных электродов. Одним из перспективных методов контроля пьезонапряжения является автогенераторный метод [8]. Целью данной работы является исследование

автогенераторного метода контроля величины пьезонапряжения с использованием модели его схемной реализации.

Метод и его ограничения

В основе предлагаемого автогенераторного метода контроля пьезонапряжения лежит изменение частоты или фазы колебания автогенератора при включении измерительной реактивности в его колебательный контур [9]. В данном случае, таким элементом является емкость, образованная двумя электродами, нанесенными на противоположные поверхности поликарбоната [5]. Механическое воздействие на поликарбонат приводит к возникновению наведенной разности потенциалов на этих электродах вследствие появляющегося пьезоэлектрического эффекта. Следует отметить, что при выборе принципиальной схемы автогенератора принималось во внимание, что изменение напряжения на емкости колебательного контура не должно влиять на режим работы активного элемента автогенератора. Кроме того, для обеспечения погрешности измерений не более 10% требование к стабильности частоты измерительного автогенератора остаются высокими [10]. Таким образом, в качестве измерительного генератора было предложено использовать автогенератор Клаппа, для которого характерна повышенная стабильность частоты. Модели принципиальных схем измерительного и опорного автогенераторов представлены на рис.1. Исследование работы схем проводилось в пакете прикладных программ Micro-Cap 9.0.

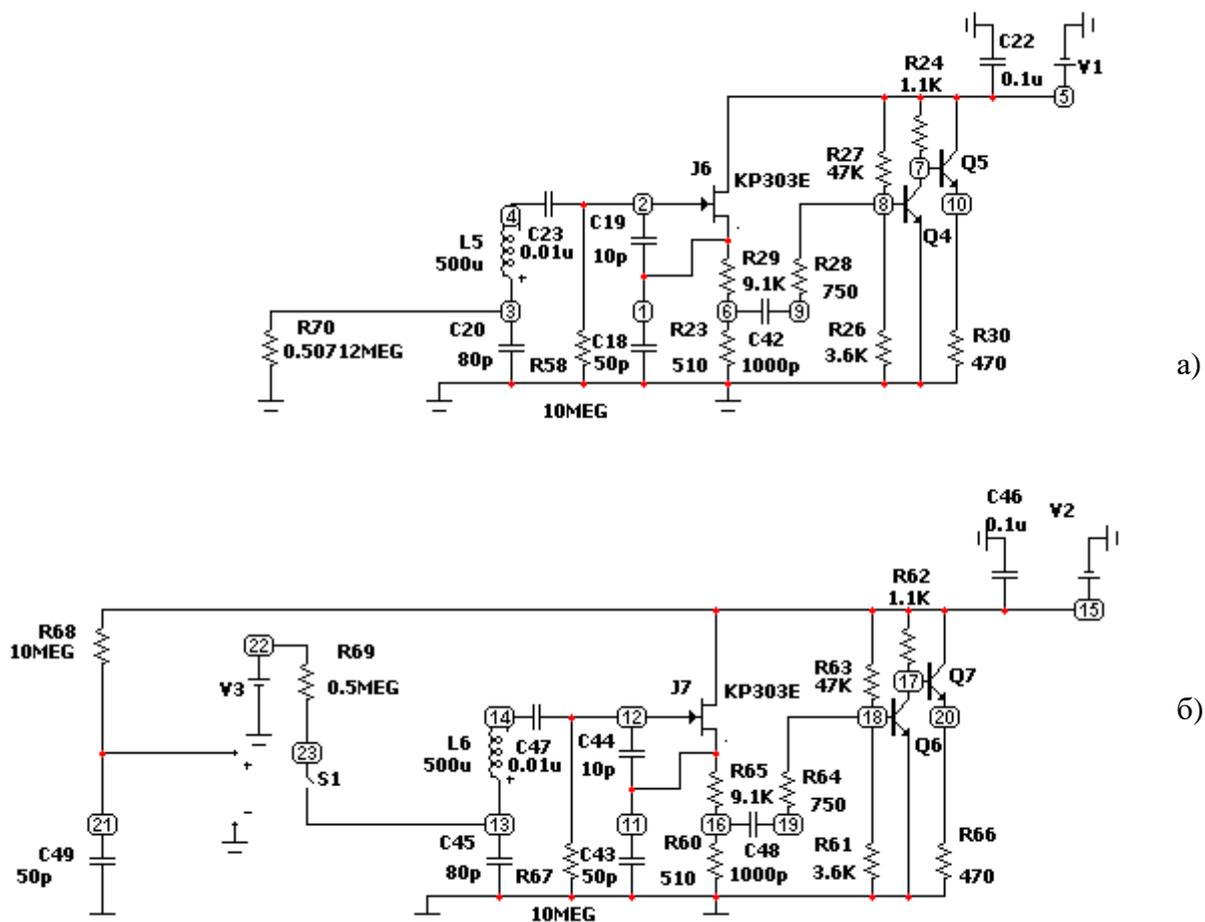


Рис.1 Принципиальные схемы опорного (а) и измерительного автогенераторов Клаппа (б)

Генератор, построенный на транзисторах J6, Q4, Q5, используется в качестве источника опорного сигнала, регистрируемого в узле 10. В генераторе, построенном на транзисторах J7, Q6, Q7, через цепь R69 и ключ S1 обеспечивается заряд емкости датчика C45 от источника постоянного напряжения V3. Это моделирует появление пьезонапряжения на емкости C45, образованной измерительными электродами, расположенными на противоположных сторонах монокристаллического поликарбоната [5]. Момент включения ключа S1 задается цепочкой R68 и C49. Постоянная времени цепи зарядки составляла 40 мкс. Выходное колебание этого автогенератора снималось в узле 20. Следует отметить, что предлагаемая схема включения измерительной реактивности C45 не влияет на положение рабочей точки транзистора J7 при изменении на ней напряжения от источника V3. В свою очередь, постоянное напряжение, задающее режим работы активного элемента J7 также не приложена к измерительной емкости C45. Таким образом, изменение постоянной составляющей напряжения на емкости C45 обусловлено только изменением пьезонапряжения, возникающем в органическом стекле под действием внешних механических воздействий. Спротивление R70 используется для установления одинаковых параметров выходных колебаний опорного и измерительного автогенераторов в отсутствие пьезонапряжения ($V_3=0$). Шаг дискретизации при моделировании составлял 200 пс. Переходные процессы формирования колебаний V_{10} и V_{20} завершаются в течение 400 ± 40 мкс.

Результаты и выводы

Результаты моделирования показывают, что изменение частоты автогенератора в зависимости от напряжения V3 крайне незначительно, и составляет ~ 3 кГц/В. Фазовое детектирование гармонических сигналов, как правило, использует анализ сигнала пропорционального произведению исследуемого с опорным, имеющим одинаковую частоту:

$$\begin{aligned} U &= U_{10} \cdot U_{20} = U_0 \sin(\omega t) \cdot U_0 \sin((\omega + \Delta\omega)t + \varphi) = \\ &= \frac{U_0^2}{2} [\cos(\Delta\omega + \varphi) - \cos((2\omega + \Delta\omega)t + \varphi)] \end{aligned} \quad (1)$$

При моделировании $U_0 = 2.75$ В. После фильтрации высоких частот (2ω) и в приближении малости φ :

$$U = \frac{U_0^2}{2} [\cos(\Delta\omega) \cdot \cos(\varphi)] \quad (2)$$

Разность фаз между колебаниями опорного и измерительного генератора в диапазоне типовых значений пьезонапряжений $0 \div 5$ В [5] незначительна и составляет ~ 0.7 град/В. Таким образом, чувствительность частоты и фазы измерительного автогенератора к величине пьезонапряжения незначительна. Поэтому определение величины пьезонапряжения по этим значениям потребует высокой стабильности (не хуже 10^{-5}) частоты автогенераторов (рис.1), что для таких схем на практике недостижимо.

На рис.2 приведена зависимость изменений частоты биений колебания (1) при изменении пьезонапряжения.

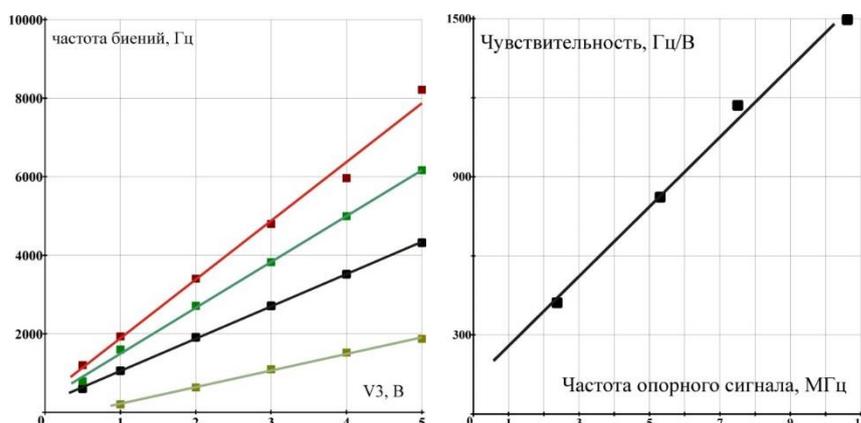


Рис.2. Изменение частоты биений при изменении V_3 .
Частота ω : (1) – 2МГц; (2)–5МГц; (3)–7МГц; (4)–10МГц

С ростом частоты ω генератора возникает отклонение от линейности (рис.2). Понижение частоты ω приводит к снижению крутизны измерительной характеристики и, следовательно, к уменьшению чувствительности измерения. Кроме того, при малой величине механической деформации органического стекла [5] частота биений становится близка к частотам промышленных помех. В связи с этим при выборе частоты ω следует ограничиться диапазоном 4÷9 МГц. При использовании блока обработки сигналов необходимо учитывать, что в результате преобразования сигналов (1) происходит удвоение частоты в спектре обрабатываемых колебаний до 8÷18 МГц. Это накладывает ограничение снизу на быстродействие АЦП и микроконтроллера при построении цифровой схемы выделения и обработки сигнала биений. Так, тактовая частота микроконтроллера должна составлять не менее 50 МГц. Снизить эти требования возможно за счет использования аналоговой схемы умножения колебаний (1) с выделением частоты биений, приведенной, например, в работе [11]. Результаты моделирования показывают, что частота биений лежит в диапазоне 0÷10 кГц при изменении пьезонапряжения в диапазоне 0÷5 В. При использовании цифровых методов обработки этого колебания уже не требуется высокого быстродействия АЦП и микроконтроллера.

Для проверки адекватности результатов моделирования предложенной схемы реализации автогенераторного метода измерения пьезонапряжения были проведены экспериментальные исследования. Схема экспериментальных исследований аналогична работе [5]. Измерение величины пьезонапряжения осуществлялось автогенераторным методом. Измерительный и опорный автогенераторы Клаппа реализованы по схеме, приведенной на рис.1, умножитель выходных колебаний реализован по схеме, приведенной в [11]. Обработка сигнала биений осуществлялась с использованием микропроцессора Arduino. Нормировка величины частоты биений f проводилась на ее максимальное значение, которое составило $5 \pm 0,5$ кГц; нормировка величины силы отклика P проводилась на максимально значение, составившее $776,75 \pm 77,6$ Н. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

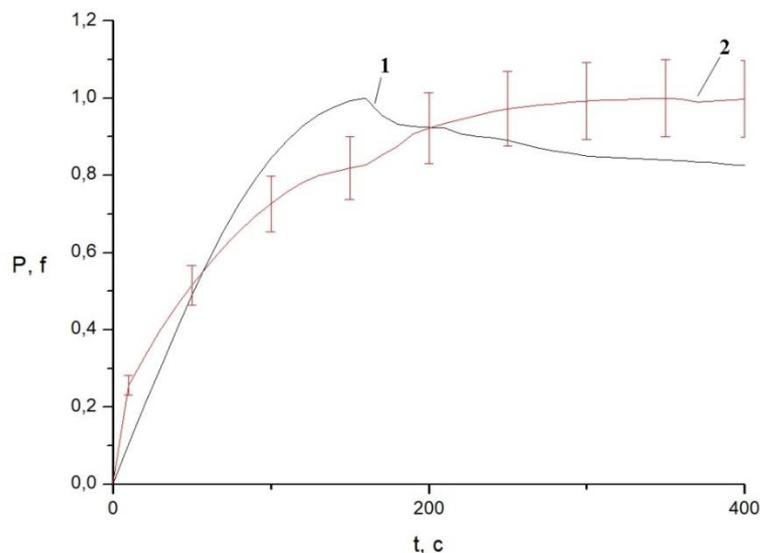


Рис. 3. Типовые зависимости силы отклика образца на внешнее воздействие и соответствующее ей изменение частоты биений колебаний автогенераторов

Стабильность частоты автогенераторов, опорного и измерительного при величине пьезонапряжения $V_3=1В$ оценивалась по методике, приведенной, например, в [12] и составила $\sim 10^{-2}$. Такой стабильности с одной стороны недостаточно, чтобы осуществлять измерения величины пьезонапряжения, с другой стороны достаточно для контроля предела прочности монолитного поликарбоната.

Заключение

Таким образом, контроль предела прочности поликарбоната возможно осуществлять с использованием автогенераторного метода путем контроля частоты биений колебаний опорного и измерительного автогенераторов. При этом необходимо обеспечить гальваническую развязку измерительной емкости в колебательном контуре измерительного автогенератора и цепей питания активного элемента. Наиболее целесообразный диапазон частот автогенераторов (опорного и измерительного) по схеме Клаппа составляет $4\div 9$ МГц с последующей аналоговой схемой выделения сигнала биения этих автогенераторов. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность моделирования и показали, что стабильности частоты $\sim 10^{-2}$ достаточно для контроля предела прочности монолитных поликарбонатных стекол.

Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер 1022041100774-3 / 1022041100496-8 от 03.06.2022.

Список литературы

1. Badalassi, M Safety factors for the structural design of glass / M. Badalassi, L. Biolzi, G. Royer-Carfagni and W. Salvatore // Construction and Building Materials. – 2014. – V. 55. – pp. 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.005>
2. Feih, S Strength Degradation of Glass and Carbon Fibres at High Temperature / S. Feih, E. Boiocchi, E. Kandare, Z. Mathys, A. G. Gibson and A. P. Mouritz // ICCM-17 (Edinburg, UK). 2009. F4.6 Feih

3. Мурашов В.В. Методология исследования физико-механических свойств и состава полимерных композиционных материалов методами технической диагностики. Часть 1 // Контроль. Диагностика. – 2018. – №6. – С. 16-22. <https://doi.org/10.14489/td.2018.06.pp.016-022>
4. Бобина Е.А., Гимадеева Л.А., Данилаев М.П. Определение механических напряжений, возникающих в полимерных стеклах в процессе эксплуатации // Инженерный вестник Дона. – 2018. – №2
5. Bobina, E A The tensile strength diagnostics of transparent monolithic polycarbonate by piezoelectric effect / E. A. Bobina, L. A. Gimadeeva, M. P. Danilaev, M. A. Klabukov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – 1515(3). – P. 032034 <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1515/3/032034>
6. Nalwa, H Ferroelectric Polymers // Marcel Dekker Inc. (New York). – 1995. – 895 pp. <https://doi.org/10.1201/9781482295450>
7. Cui, H Three-dimensional printing of piezoelectric materials with designed anisotropy and directional response / H. Cui, R. Hensleigh, D. Yao and D. Maurya // Nature Materials. – 2019. – V. 18. – PP. 234-241. <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0268-1>
8. Zakarluk, N M, On-board autodyne velocity sensors for aeroballistic inspections / N. M. Zakarluk, V. Y. Noskov, S. M. Smolskiy // 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – 2010. – 5632812. – pp. 1065-1068. <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2010.5632812>
9. Пат. 935700 СССР, G01B7/00. Устройство для измерения неэлектрических величин. Авторы: Л.Г. Темник, К.С. Популях, М.В. Кривогин, В.К. Гусельников, М.Н. Селицкий; заявл. 19.11.80; опубл. 15.06.82 Бюл.№22.
10. Collins, T F Software-Defined Radio for Engineers / T. F. Collins, R. Getz, D. Pu, A. M. Wyglinski // Artech House Mobile Communications (London). – 2018. – 375 p.
11. Вениаминов, В. Н. Микросхемы и их применение / В. Н. Вениаминов, О. Н. Лебедев, А.И. Мирошниченко // М.: Радио и связь. – 1989. – 240с.
12. Rubiola, E Phase noise and frequency stability in oscillators // Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators. – 2008. – 9780521886772. – pp. 1-203 <https://doi.org/10.1017/CBO9780511812798>

PIEZOELECTRIC VOLTAGE MEASUREMENT OF POLYCARBONATE USING THE AUTOGENERATING METHOD

E.A. Bobina, S.A. Karandashov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The article deals with the autogenerating method of measuring the piezoelectric voltage of polycarbonate. It is shown that the frequency range of autogenerators used to measure piezoelectric voltage lies within 4÷9 MHz. Experimental studies aimed at confirming the correctness of the simulation were carried out. It is shown that for controlling the strength limit of polycarbonate the frequency stability of the reference and measuring autogenerators $\sim 10^{-2}$ is sufficient.

Keywords: autogenerating method, piezoelectric effect, polycarbonate, piezo-voltage measurement.

Дата отправки статьи в редакцию 27 декабря 2022г.