

УДК 539:537.226.4

М. И. Дмитриук, Л. В. Жога

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО МЕХАНИЧЕСКОМУ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ НАГРУЖЕНИЮ

Приведены результаты исследований кинетики импульсов напряжения $V(t)$, возникающих в ходе эксперимента по разрушению поликристаллической сегнетокерамики (ПСК) в механическом и электрическом полях. Для анализа результатов использован метод фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС). На основании этого метода сделана попытка прогнозирования разрушения ПСК в электрическом поле.

К л ю ч е в ы е с л о в а : поликристаллическая сегнетокерамика, спектральная плотность мощности тока (СПМ), разностный момент, параметр нестационарности.

The results of the kinetics research of the potential pulses $V(t)$, which are accrued during experiment for destruction of the polycrystalline ferroelectric ceramics (PFC) in mechanical and electrical field, are described. The method of the flicker-noise spectroscopy (FNS) is employed for analysis results. The attempt is made to predict the destruction of the PFC in the electric field based on this method.

К e y w o r d s : polycrystalline ferroelectric ceramics (PFC), power spectral density of current (PSD), different moment, nonstationarity parameter.

Введение. Во всех случаях на электродах сегнетокерамического образца при приложении к нему нагрузки из-за наличия пьезоэффекта, эффекта Баркгаузена и микроразрушения появляются заряды [1—3]. Во время такой эволюции происходят перестройки структуры, связанные с перераспределением свободных зарядов, движением доменных стенок и другими дефектами. Вид перестройки диссипативных структур может характеризоваться самоорганизованной критичностью [4]. Согласно релаксационной модели разрушения ПСК [5, 6], параллельно происходят два процесса разрушение и релаксация перенапряжений путем перестройки структуры за счет кинетики доменных стенок, межфазовых границ и других дефектов поликристаллического образца. Причем такие перестроения структуры можно обнаружить по появлению импульсов напряжения (всплесков, скачков) на включенном в цепь сопротивлении [1]. Для анализа экспериментальных результатов в виде временного ряда (зависимости амплитуды и продолжительности импульса от времени) можно использовать подход, заключающийся в придании информационной значимости корреляционным взаимосвязям, которые реализуются в последовательностях нерегулярностей сигнала — всплесках, скачках как носителях информации об изменениях, происходящих на каждом пространственно-временном уровне структуры иерархической организации исследуемых образцов под нагрузкой [7]. Для классификации информации, заключенной в корреляционной функции, анализировали динамику изменения спектра мощности $S(f)$ и разностного момента второго порядка $\Phi^{(2)}(t)$. В случае нестационарного процесса рассчитывался параметр нестационарности (ПН), и величины всплесков ПН могут рассматриваться как прогнозный признак, который характеризует структурные перестройки в образце. Показано, что максимальное значение ПН предшествует моменту разрушения образца.

Сущность метода фликкер-шумовой спектроскопии. Появление в сложной динамической системе фликкер-шума связывается с эффектом перемежаемости (интермиттанса), который представляет собой смену достаточно длительных участков ламинарного или регулярного во времени поведения характеристик неравновесной динамической системы участками хаотических всплесков и скачков [5, 7]. Сущность ФШС-подхода заключается в придании информационной значимости корреляционным взаимосвязям, которые реализуются в последовательностях нерегулярностей сигнала — всплесках, скачках, изломах производных различных порядков как носителях информации об изменениях, происходящих на каждом пространственно-временном уровне иерархической организации исследуемой динамической системы. В качестве базового образа для извлечения информации из сложных сигналов в ФШС-методе используется корреляционная функция

$$\psi(\tau) = \langle V(t)V(t+\tau) \rangle, \quad (1)$$

где $V(t)$ — искомый ряд динамической переменной x ; τ — параметр временной задержки, а угловые скобки обозначают осреднение по временному интервалу T

$$\langle (...) \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (...) dt. \quad (2)$$

Для классификации информации, заключенной в корреляционной функции $\psi(\tau)$, удобно анализировать не саму эту функцию, а некоторые ее преобразования («проекции»), такие как спектр мощности $S(f)$ (f — частота) и разностный момент («переходная структурная функция») $\Phi^{(2)}(\tau)$ второго порядка:

$$S(f) = \int_{-T/2}^{T/2} \langle V(t)V(t+\tau) \rangle \exp(-2\pi i f \tau) d\tau, \quad (3)$$

$$\Phi^{(2)}(\tau) = \langle [V(t) - V(t+\tau)]^2 \rangle. \quad (4)$$

Из приведенных соотношений следует, что «паспортные данные», извлекаемые из анализа зависимостей $S(f)$ и $\Phi^{(2)}(\tau)$, построенных на основе временных рядов $V(t)$, имеют смысл времен корреляций, или параметров, характеризующих потерю «памяти» (корреляционных связей) для рассматриваемых нерегулярностей типа всплесков и скачков. При этом в формирование зависимостей $\Phi^{(2)}(\tau)$ вносят вклад только нерегулярности типа скачков динамической переменной $V(t)$, а в формирование $S(f)$ — и скачки, и всплески (выбросы) хаотических серий $V(t)$. Соответствующие параметры для нерегулярностей типа разрывов производных извлекаются из спектров мощностей и разностных моментов, построенных на основе «квазипроизводных» исходного сигнала [2, 3]. Основная цель ФШС-процедур заключается в анализе зависимостей $S(f)$ и $\Phi^{(2)}(\tau)$, а точнее, в анализе динамики их изменения в пределах скользящего интервала длиной T , последовательно смещаемого в каждый дискретный момент времени $k\Delta T$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) на величину ΔT . В качестве меры изменения зависимостей $S(f)$ и $\Phi^{(2)}(\tau)$ во времени ФШС-процедура предполагает использование безразмерного критерия — параметра нестационарности, выражение для которого задается соотношением вида

$$D(t_{k+1}) = 2 \frac{Q_{k+1} - Q_k}{Q_{k+1} + Q_k} \frac{\Delta T}{T}, \quad (5)$$

$$Q_k = \int_0^{\tau_{\max}} [\Phi^{(2)}(\tau)]_k d\tau \quad \text{или} \quad Q_k = \int_0^{f_{\max}} [S(f)]_k df. \quad (6)$$

Как следует из самого названия, вводимое соотношение характеризует «меру нестационарности» анализируемого временного ряда при перемещении интервала усреднения T по оси времени на величину ΔT . Очевидно, что теоретически для стационарных процессов при неизменных значениях $\tau_{\max}$ или $f_{\max}$ величина ПН $D(t)$ будет равняться нулю на любом интервале усреднения. Фактически же величина параметра $D(t)$ должна варьировать от низких значений на интервалах, где наблюдаются регулярные вариации, до весьма значительных там, где обнаруживаются нерегулярности типа всплесков, скачков и изломов производных. При этом возможность идентификации нерегулярностей различного масштаба связана с самой возможностью вариации величины интервала усреднения T . Этот факт имеет большое значение, поскольку эволюция нестационарной системы может характеризоваться целым набором характерных времен структурных перестроек для соответствующего набора масштабов пространственной организации системы. В связи с этим проблема прогнозирования становится многопараметрической, ориентированной на поиск по крайней мере нескольких временных «предвестников» катастрофического события, разнесенных по масштабу времени [5].

Анализ данных наблюдений методом ФШС. На рис. 1 представлена принципиальная схема нагружения образца ПСК. В ходе проведения эксперимента отмечено, что испытуемый образец работает как пьезодатчик, реагируя на изгибные возмущения в окружающей среде, причем в этом случае импульсы имеют положительную и отрицательную составляющую, а среднее значение импульса по времени равно нулю, что позволяет считать процесс стационарным.

На рис. 2 представлена запись сигнала динамической переменной $V(t)$. Из рисунка видно, что время возникновения сигналов случайно, что подтверждается диаграммой соответствующей спектральной плотности мощности напряжения таких сигналов в логарифмических координатах: график представляет собой функцию, которая практически не зависит от частоты (белый шум) до 0,001 Гц. Только при более низких частотах появляется зависимость спектральной плотности мощности сигнала от частоты (фактически фликкер-шум при показателе степени 0,9).

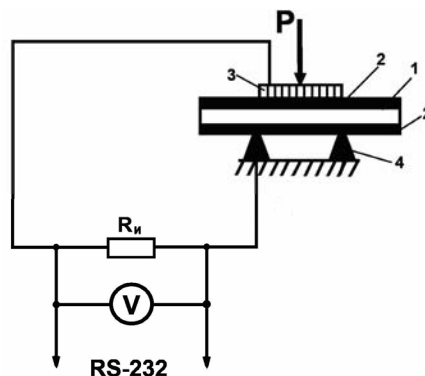


Рис. 1. Схема установки при механическом нагружении образцов: 1 — образец ПСК; 2 — электроды; 3 — нагружающий пуансон; 4 — нижняя опора

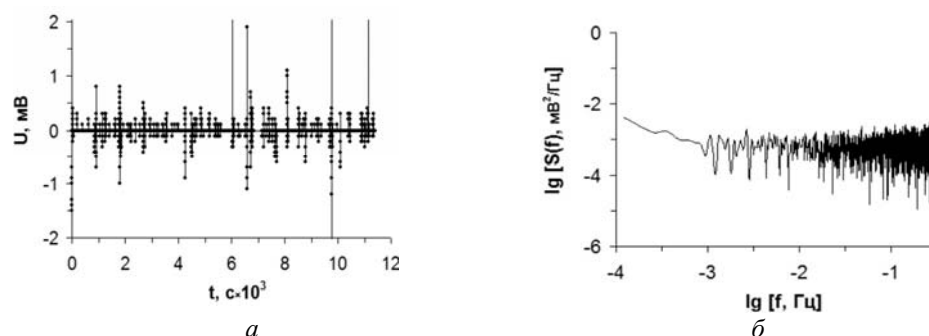


Рис. 2. Исходные значения динамической переменной $V(t)$ до исключения влияния внешних воздействий (образец ПСК работает как пьезодатчик, реагируя на случайные внешние возмущения — различного рода колебания системы) (а), диаграмма спектральной плотности мощности сигнала в логарифмических координатах (б)

Во второй части эксперимента экспериментальная установка была преобразована: методом демпфирования исключили воздействие больших внешних случайных сигналов и таким образом исследовали оставшийся сигнал. В результате после получения сигнала в ходе проведения эксперимента, как видно из рис. 3, б, удалось исключить большие случайные внешние возмущения. Однако помимо реакции ПСК на запланированное механическое нагружение (рис. 6) остались также различные всплески и скачки меньшей амплитуды. При установлении природы их возникновения мы исследовали сигналы, возникающие при выдержке образца при постоянной внешней нагрузке (рис. 4), что дало возможность исключить сигналы от макроскопического пьезоэффекта. Далее обнаружили заметное отличие импульсов, возникающих при постоянной внешней нагрузке, в том, что они являются только положительными (рис. 4). Предположив, что импульсы возникают из-за процессов перестройки доменной структуры, а также образования микротрещин, возможность возникновения которых была показана в работах [4, 6], мы исследовали закономерности их возникновения и их связь с процессом разрушения образцов.

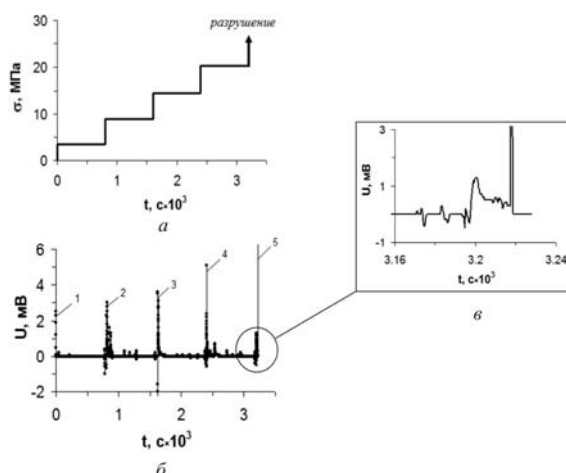


Рис. 3. Схема ступенчатого механического нагружения образца ПСК (а); сигнал динамической переменной $V(t)$ от соответствующего нагружения (б); в увеличенном масштабе показан момент разрушения ПСК от последнего нагружения ($\sigma = 25,9$ МПа) (в)

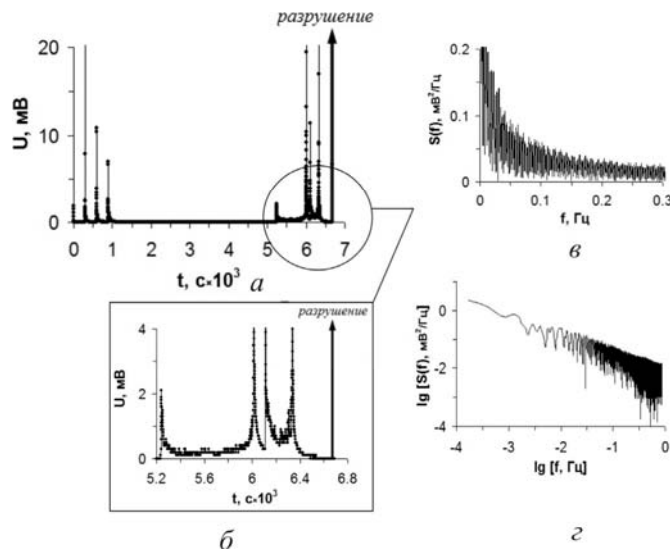


Рис. 4. Сигнал динамической переменной $V(t)$ при выдержке под постоянной механической нагрузкой (а), сигнал (в увеличенном масштабе) при разрушении ПСК ($\sigma = 20,3$ МПа) (б), спектральная плотность мощности сигнала (в, г)

В случае исследования временного ряда $V(t)$ при постоянной нагрузке (см. рис. 4) можно отметить, что процесс не является стационарным на всем участке измерения, но в момент времени 10^3 с от начала нагружения появляются положительные импульсы, спектральная плотность мощности которых зависит от частоты с показателем степени 0,7.

На рис. 5 представлена зависимость ПН, рассчитанного для данного временного ряда (интервал усреднения $T = 10$ с, шаг $\Delta T = 1$ с). Как видно из рисунка, основными «структурными элементами» вариаций ПН являются всплески его значений различной амплитуды, длительности и знака. Амплитуда всплеска может являться показателем масштаба нерегулярности ПН, попадающей в пределы скользящего окна при его последовательном смещении вдоль оси времени.

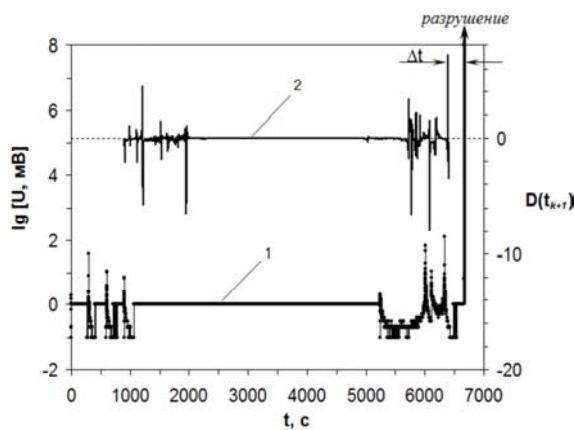


Рис. 5. Кинетика $V(t)$ при выдержке под постоянной нагрузкой $\sigma = 20,3$ МПа (1) и соответствующий параметр нестационарности сигнала (2) (интервал усреднения $T = 10$ с, шаг $\Delta T = 1$ с)

Длительность всплеска также будет характеризовать масштаб ПН, но в большей степени будет зависеть от величины ΔT . Относительно знака изменения ПН можно сказать, что информационную значимость представляют только положительные вариации ПН. Отрицательные значения ПН являются как бы эхом переднего фронта скользящего окна и не несут никакой самостоятельной информации [5]. Таким образом, при анализе вариаций ПН нас будут интересовать положительные всплески его значений достаточно большой амплитуды. Проявление в исходных временных рядах различного рода нерегулярностей, вероятно, является обязательным признаком подготовки значимого события и может быть следствием, к примеру, движения неспецифического характера доменных стенок [5], приводящего к разрушению образца. На рис. 6 всплеск ПН за некоторое время до момента разрушения образца дает возможность связать возникающие импульсы $V(t)$ с процессом разрушения.

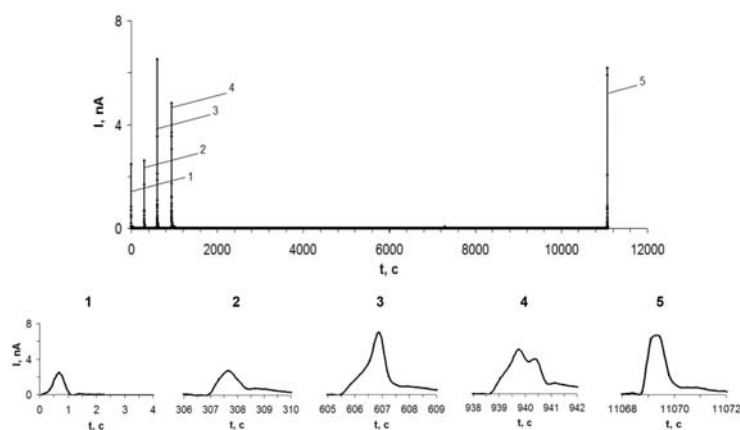


Рис. 6. Сигнал динамической переменной $V(t)$ от выдержки при постоянной механической нагрузке 20,3 МПа. Ниже приведены соответствующие импульсы тока через сопротивление R от нагружения в увеличенном масштабе

В итоге можно отметить, что получены временные ряды напряжения в виде скачков и всплесков различной амплитуды как при изменении, так и при постоянной внешней механической нагрузке на ПСК, которые свидетельствуют о перестройке дефектной структуры материала (доменных, межфазных границ и других дефектов) и удовлетворительно согласуются с результатами, полученными в [1, 3].

Универсальность критерия ПН и относительная простота оценки его значимости позволяют сделать вывод о том, что всплески вариаций ПН могут рассматриваться как универсальный прогнозный признак изменения состояния исследуемой системы, которое может быть связано с процессами подготовки разрушения. Кроме этого, необходимо отметить максимально формализованный характер процедуры идентификации рассматриваемого прогнозного признака (всплесков ПН), что делает возможным алгоритмизацию всей последовательности операций, направленных на оценку опасности разрушения по данным наблюдений, начиная с обращения к базе данных и заканчивая, собственно, выдачей экспертного заключения.

Электрическое нагружение ПСК. На рис. 7 представлена принципиальная схема экспериментальной установки для электрического нагружения образца ПСК. Далее, на рис. 8, представлена схема электрического нагружения образцов ПСК, а также диаграмма сигнала динамической переменной $V(t)$. Из рис. 8 видно, что при постоянной электрической нагрузке 4 МВ/м так же, как и в случае с механическим нагружением ПСК, наблюдаются импульсы (скачки) напряжения различной амплитуды. Природа возникновения импульсов изложена в работах [5, 1]. Следовательно, появляется возможность придания таким импульсам информационной значимости, то есть определения их связи с процессом разрушения образца.

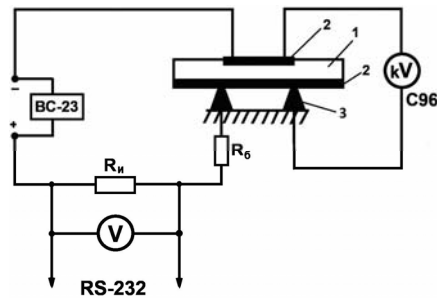


Рис. 7. Схема установки при электрическом нагружении образца: 1 — образец ПСК; 2 — электроды; 3 — нижняя опора

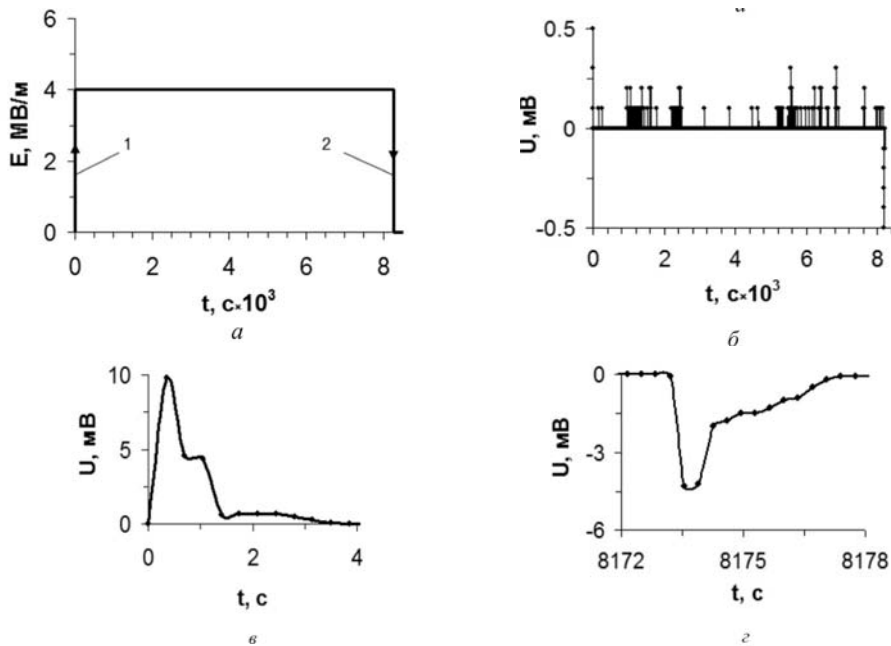


Рис. 8. Схема электрического нагружения образцов ПСК (а): 1 — характер изменения внешнего электрического поля; 2 — момент снятия электрического поля; фиксируемый сигнал динамической переменной $V(t)$ (б); сигнал от приложения электрического поля в увеличенном масштабе (в); сигнал от снятия электрического поля в увеличенном масштабе (г)

В частности, на рис. 9 приведен график СПМ для динамической переменной $V(t)$ образца ПСК, находящегося в постоянном электрическом поле 4 МВ/м. Далее на основании анализа СПМ и разностного момента можно сделать вывод о целесообразности построения диаграммы ПН.

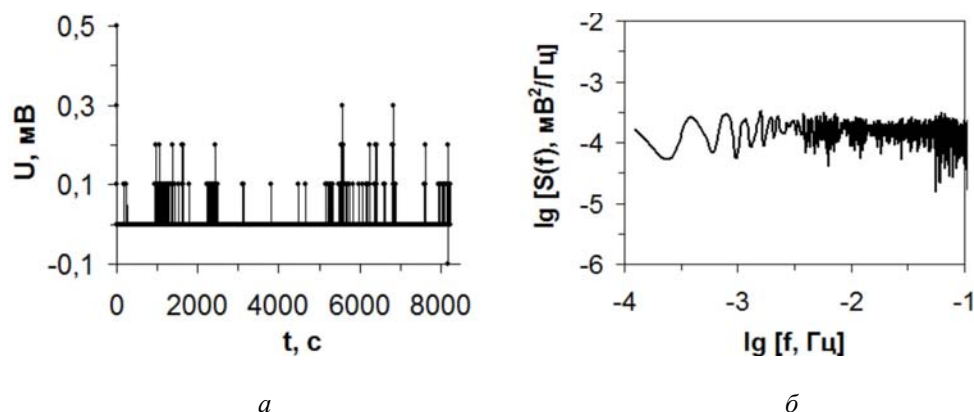


Рис. 9. Сигнал динамической переменной $V(t)$ при выдержке под постоянной электрической нагрузкой 4 МВ/м (а), спектральная плотность мощности данного сигнала в логарифмических координатах (б)

Заключение. Анализируя результаты нагружения ПСК в механических и электрических полях, можно сделать вывод об одной природе возникновения импульсов в обоих случаях. При постоянной нагрузке и в первом, и во втором случаях возникают импульсы напряжений, связанные с перестройкой внутренней структуры. В итоге возможны два варианта преобразования структуры сегнетоэлектрической керамики под нагрузкой: либо релаксация механических и электрических напряжений, что замедляет процесс разрушения, либо протекающий процесс микроразрушения, результатом которых является катастрофическое событие, связанное, в нашем случае, с разрушением ПСК, но в обоих случаях их анализ позволяет предсказывать момент разрушения образца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудяк В. М. Процессы переключения в нелинейных кристаллах. М. : Наука, 1986.
2. Степанов В. А., Песчанская Н. Н., Шпейзман В. В. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. Л., 1984. 246 с.
3. Судьенков Ю. В. Электромагнитное излучение при разрушении пьезоэлектриков субмикросекундными импульсами давления // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 12. С. 101—103.
4. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел., М. : Наука, 1974. 560 с.
5. Тимашев С. Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М. : Физматлит, 2007. 248 с.
6. Жога Л. В., Шпейзман В. В. Кинетика хрупкого разрушения материалов в электрических и механических полях. Волгоград : ВолгГАСУ, 2008. 198 с.
7. Timashev S. F., Polyakov Yu. S. Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry // Fluctuation and Noise Letters. 2007. Vol. 7. № 2. P. R15—R47.
1. Rudyak V. M. Protsessy pereklyucheniya v nelineinykh kristallakh. M. : Nauka, 1986.
2. Stepanov V. A., Peschanskaya N. N., Shpeyzman V. V. Prochnost i relaksatsionnye yavleniya v tverdykh telakh. L., 1984. 246 s.

3. *Sudienkov U. V.* Electromagnitnoe izluchenie pri razrushenii piezoelektrikov submicro-secondnymi impulsami davleniya // GTF. 2001. T. 71. V. 12. S. 101—103.
4. *Regel V. R., Slutsker A. I., Tomashevsky E. Ye.* Kineticheskaya priroda prochnosti tvyordykh tel., M. : Nauka, 1974. 560 s.
5. *Timashev S. F.* Flicker-shumovaya spectroscopia: informatsia v khaoticheskikh signalakh. M. : Fizmatlit, 2007. 248 s.
6. *Zhoga L. V., Shpeyzman V. V.* Kinetika khrupkogo razrusheniya materialov v electriceskikh i mekhanicheskikh polyakh. Volgograd : VolgGASU, 2008. 198 s.
7. *Timashev S. F., Polyakov Yu. S.* Review of flicker noise spectroscopy in electrochemistry // Fluctuation and Noise Letters. 2007. Vol. 7. № 2. P. R15—R47.

© Дмитрук М. И., Жога Л. В., 2011

Поступила в редакцию
в октябре 2011 г.

Ссылка для цитирования:

Дмитрук М. И., Жога Л. В. Сравнение параметров нестационарности поликристаллической сегнето-керамики в экспериментах по механическому и электрическому нагружению // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2011. Вып. 4(19).