

УДК 531.768:534.1

## МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЬЕЗОДЕФЛЕКТОРА

А.А. Цупин\*, М.С. Слободян, В.Н. Масленников\*\*, С.М. Слободян\*\*

Томский политехнический университет  
\*НПК «Изотермик», г. Москва

\*\*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: s.m.s@ngs.ru; tsupin@mail.ru

Определена теоретически зависимость шума электрически возбужденных затухающих колебаний пьезоэлектрического элемента от его неисправностей. Предложен метод оценки качества пьезоэлектрического дефлектора лазерного створа (указателя направления) в реальном времени.

Для получения достоверной информации о ходе процессов находят применение датчики как первичные преобразователи одной физической величины в другую более удобную для дальнейшего использования.

При множестве конструкций и принципов работы для диагностики многих процессов нашли применение датчики на пьезоэлектрических элементах – преобразователях энергии одного вида в другой [1–8] из-за высокой устойчивости работы в условиях воздействия агрессивных сред. Более того, обратимые свойства пьезоэлектрического материала элементов позволяют использовать их в качестве вторичных преобразователей информации в измерительных устройствах и системах управления [4–6], а именно для управления волновым фронтом лазерного излучения и пространственным положением лазерных пучков.

Вполне естественно, что для прецизионных лазерных средств вопросы идентификации и стабильности характеристик, объективной диагностики в реальном времени параметров пьезоэлектрических дефлекторов (элементов углового или линейного перемещения светового луча), вида и характера их неисправности являются приоритетными и важными. Качество сборки, дефекты пьезоэлектрических элементов и многие другие факторы, в конечном счете, определяют метрологические параметры лазерного створа. Дефекты изготовления и сборки пьезоэлектрического дефлектора, в общем случае, являются случайными и статистически, чаще всего, равномерно распределенными параметрами. Поэтому их проявление объективнее оценивать общепринятым подходом через статистические параметры, в частности, по изменению под влиянием дефекта мощности (дисперсии) помех в сигнале дефлектора как искажение его отклика на калиброванное воздействие.

В настоящей работе на основе разработанной эквивалентной схемы проведен анализ влияния дефектов лазерного пьезоэлектрического дефлектора, контроль качества которого проводится путем [7] электрического воздействия для возбуждения резонансного отклика с последующей оценкой дисперсии шума, обуславливающего искажение формы возбужденных колебаний, как признаку характерной неисправности или дефекта. Для минимизации влияния на сигнал пьезоэлектрического элемента принято, что входной предварительный

усилитель сигнала выполнен на полевом транзисторе. На практике [8, 9] – это часто выполняется.

Таким образом, эквивалентная схема пьезоэлектрического элемента, совмещенного с усилителем сигнала, представляет собой цепь параллельно соединенных генератора заряда, паразитных емкостей и сопротивления утечки, влиянием которого, чаще всего, пренебрегают на фоне других шунтирующих сопротивлений. Для анализа принято, что емкость – функция свойств пьезоэлектрического элемента и неисправности (дефекта сборки или отклонения технологии) дефлектора в целом.

Эквивалентная схема входной цепи усилителя, выполненного на полевом транзисторе с пьезоэлектрическим элементом на входе, приведена на рисунке.

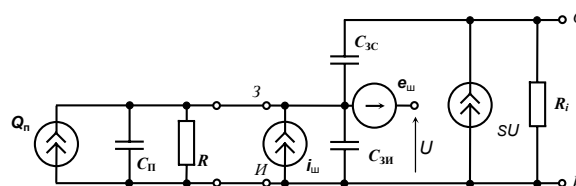


Рисунок. Эквивалентная схема входной цепи

На эквивалентной схеме входной цепи усилителя, выполненного на полевом триоде с пьезоэлектрическим элементом на входе, обозначено:  $Q_n$  – сигнальный заряд;  $C_n$  – эквивалентная емкость преобразователя (с учетом влияния дефектов);  $R$  – общее резистивное сопротивление входной цепи;  $i_{ш}$ ,  $e_{ш}$  – эквивалентные источники тока и напряжения шумов полевого транзистора;  $C_{зи}$ ,  $C_{зс}$  и  $S$  – его входная и проходная емкости и крутизна проходной характеристики; «З», «И», «С» – затвор, исток и сток полевого транзистора;  $U$  – напряжение сигнала.

Из анализа схемы следует, что эквивалентный шумовой ток, приведенный к входным полюсам усилителя (к полюсам преобразователя), в элементарной полосе  $df$  может быть представлен выражением [9]:

$$\begin{aligned} \overline{di_{ш.ш.с}^2} &= 4kT \frac{1}{R} df + 2qI_3 df + \\ &+ 4kT r_{ш} \left( 1 + \frac{f_{ФЛ}}{f} \right) \frac{1 + \omega^2 R^2 C_z^2}{R^2} df \equiv \\ &\equiv 4kT \frac{1}{R} \left[ 1 + \frac{I_3 R}{2\varphi_T} + \frac{r_{ш}}{R} \left( 1 + \frac{f_{ФЛ}}{f} \right) (1 + \omega^2 R^2 C_z^2) \right] df, \quad (1) \end{aligned}$$

где  $k$ ,  $q$  и  $T$  – постоянная Больцмана, заряд электрона и абсолютная температура в Кельвинах;  $\varphi_T = kT/q$  – равновесный потенциал;  $I_3$ ,  $r_{ш} \approx 0,7/S$  и  $f_{\PhiЛ}$  – ток затвора, сопротивление шума и частота, на которой спектральные составляющие тепловых шумов канала и фликкер-шумов полевого транзистора равны;  $\omega = 2\pi f$  – круговая и  $f$  – текущая частота;  $C_{\Sigma} = C_{\Pi} + C_{3и} + C_{3с}$  – емкость входной цепи;  $C_{\Pi}$  – эквивалентная емкость пьезоэлектрического элемента при  $C_{\Sigma} = C_{\Pi} + C_{3и} + C_{3с}(1 + K_0)$ ;  $K_0$  – коэффициент усиления каскада при отсутствии обратной связи.

Встраивание в пьезоэлектрический дефлектор усилителя заряда повышает помехоустойчивость его диагностики. Для обычного на практике случая, мы рассматриваем эквивалентную емкость входной цепи как суммарную емкость пьезоэлектрического элемента.

Проводя анализ проявления разных физических аспектов упругой деформации пьезоэлектрического элемента при заземлении краев, заметим, что схемотехнически его емкость включается через паразитные емкости контактного монтажа заземлением. Именно паразитные емкости области контакта, являющиеся функцией способа заземления краев пьезоэлектрического элемента, в конечном счете, и определяют динамику изменения резонансного отклика при тестовом контрольном воздействии на дефлектор. При отсутствии их влияния амплитудно-частотная характеристика пьезоэлектрического элемента может быть описана аналитическим выражением, полученным в [4, 6], адекватно отражающим соответствующие экспериментальные данные.

При «дребезге» контакта пьезоэлектрического элемента в области заземления образуется последовательная емкостная цепь «контакт+» – «пьезоэлектрический элемент» – «контакт-». Значения паразитных емкостей контакта сигнальных пластин стока зарядов пьезоэлектрического элемента, из-за стохастичности вариаций усилий прижима контакта, обусловленных изменениями упругой деформации пьезоэлектрического элемента (распределенной системы), являются величинами случайными, равновероятно распределенными в интервале значений  $0 \dots \infty$ . В первом приближении нулевое значение – это пренебрежение влиянием паразитных емкостей (хороший контакт) и «бесконечность» – отсутствие контакта – разрыв цепи передачи зарядов. Характерные изменения резонансного отклика для этих случаев приведены в [7]. Они проявляются в виде аддитивной шумовой реализации на резонансном отклике, либо исключающие его наблюдение – в случае разрыва цепи. В последнем случае емкость дефлектора столь велика, что резонансный отклик становится интегральной оценкой – математическим ожиданием для почти периодической функции отклика, имеющим очень малое значение (отклик плохо наблюдаем).

Умножением (1) на квадрат модуля статического импеданса найдется приведенное к входу усили-

теля значение квадрата напряжения шумов (это напряжение, усиленное, повторится по форме на выходе усилителя, если будет скорректировано влияние обратной связи через  $C_{3с}$  – эффект Миллера):

$$\overline{dU_{ш}^2} = \overline{dI_{ш.у.с}^2} \frac{R^2}{1 + \omega^2 C_{\Sigma}^2 R^2}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) видно, что не все составляющие напряжения шума растут так же, как полезный сигнал (пропорционально увеличению модуля импеданса), поэтому всегда выбирают значение величины  $R$ , как можно больше. Из (1) при неограниченном увеличении  $R$  нетрудно получить предельное значение квадрата шумового напряжения в рассматриваемой точке:

$$\overline{dU_{ш}^2} = 2qI_3 \frac{1}{\omega^2 C_{\Sigma}^2} df + 4kTr_{ш} \left( 1 + \frac{f_{\PhiЛ}}{f} \right) df.$$

При известном заряде сигнала  $Q_{\Pi}$  интегрированием в выбранной полосе частот  $\Delta f = f_b - f_n$  определяется наилучшее отношение сигнал/шум на выходе усилителя:

$$\Psi = \frac{Q_{\Pi}/C_{\Sigma}}{\sqrt{\overline{dU_{ш}^2}}} = \frac{Q_{\Pi}}{\sqrt{4kT \left[ \frac{I_3}{2\varphi_T} \frac{1}{\omega_b \omega_n} + r_{ш} C_{\Sigma}^2 \left( 1 + \frac{f_{\PhiЛ}}{\Delta f} \ln \frac{f_b}{f_n} \right) \right] \Delta f}}.$$

Отношение сигнал – шум однозначно тем больше, чем меньше значения таких параметров входной цепи, как  $I_3$ ,  $r_{ш}$ ,  $C_{\Sigma}$  и  $f_{\PhiЛ}$ .

Мерой точности оценки качества пьезоэлектрических дефлекторов предлагаемым методом является величина обратно пропорциональная отношению сигнал/шум. Таким образом, чем больше отношение сигнал/шум в реализации резонансного отклика пьезоэлектрического дефлектора на тестовое воздействие, тем выше его качество.

## Выводы

Теоретическое определение количественного вклада каждого из факторов на основе разработанной эквивалентной схемы симбиоза пьезоэлектрического элемента с усилителем заряда, практически исключая влияние на характеристики дефлектора, позволяет выделить индивидуальную особенность влияния и меру вклада в тестовый отклик каждого отдельного дефекта сборки и технологии изготовления.

Предложенный метод оценки качества пьезоэлектрического дефлектора сводит к минимуму различие конструктивных решений и его легко адаптировать к циклу единой диагностики состояния и качества пьезоэлектрических устройств.

Исследования выявили, что основная сущность предложенной модификации метода оценки качества для диагностики неисправности пьезоэлек-

трических элементов по форме их затухающих резонансных колебаний — отклика на контролируемое электрическое воздействие заключается в том, что наибольшее влияние на характеристики резонансного отклика дефектов оказывает изменение емкости пьезоэлектрического элемента при наличии отклонений качества сборки, проявляющейся из-за вариации усилий формирования контакта и возникновения дополнительной паразитной емкости, резко меняющей свойства его резонансного отклика.

В литературе отсутствуют закономерности, связывающие выходные характеристики пьезоэлектрических устройств отклонения светового (лазерного) пучка с особенностями проявления дефектов. Не выяснены физико-механические свойства характера влияния конструкции дефлектора на его выходной сигнал как характеристику прибора в целом для метрологии лазерного створа с пьезоэлектрическим дефлектором пучка.

Для решения многофункциональной и неоднозначной задачи диагностики дефектов пьезоэ-

лектрического дефлектора (класс распределённой системы) по форме электрически возбуждённых затухающих резонансных колебаний необходим набор экспериментальных статистических данных для уточнения закономерности влияния превалирующих дефектов на характеристику прибора в целом. При этом заслуживают внимания результаты работы [7].

Принципиальным является вопрос о количественной оценке взаимосвязи отклонений качества и элементного состава пьезоэлектрического дефлектора на характеристики лазерного указателя направления (целеуказателя, створа).

В данной работе предложен эффективный метод оценки качества пьезоэлектрического дефлектора по уровню эквивалентной мощности помех в тестовом электрически возбужденном резонансном отклике.

Установлено, что электрофизические характеристики пьезоэлектрических дефлекторов как распределенной системы зависят от множества факторов, включая дефекты сборки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. — М.: Техносфера, 2006. — 629 с.
2. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. — М.: Энергия, 1978. — 248 с.
3. Дунаевский В.П., Корниенко Г.И., Субботин М.И., Сумский В.П. Пьезоэлектрические вибропреобразователи для вибрационного контроля и диагностирования // Приборы и системы управления. — 1993. — № 9. — С. 13–14.
4. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. — Барнаул: Азбука, 2006. — 224 с.
5. Слободян М.С., Слободян С.М. Консольный пьезопривод // Датчики и системы. — 2003. — № 3. — С. 47–48.
6. Слободян С.М. Оптимизация биморфного привода оптических измерительных систем с обратной связью // Измерительная техника. — 2003. — № 1. — С. 19–23.
7. Субботин М.И. Диагностирование пьезоэлектрических датчиков по форме их затухающих резонансных колебаний // Измерительная техника. — 2003. — № 2. — С. 46–47.
8. Симонсен Э. Датчик давления МБС для промышленных установок // Приборы и системы управления. — 1993. — № 12. — С. 45–46.
9. Масленников В.Н. Шумы предварительного усилителя пьезодатчика // Электромеханические преобразователи энергии: Матер. Междунар. науч.-техн. конф., 17–19 октября 2007 г. — Томск: ГПУ, 2007. — С. 79–80.
10. Дунаевский В.П., Корниенко Г.И., Субботин М.И., Сумский В.П. Аппаратура для вибрационного контроля промышленного оборудования // Приборы и системы управления. — 1993. — № 9. — С. 18–19.

*Поступила 20.11.2007 г.*