

Ю.Н. Рыкунич,  
А.Е. Ситников, канд. техн. наук  
Е.И. Барилюк  
ПАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения»  
г. Киев, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРИВОДОВ ДТВ

*Показано зв'язок кінетичної енергії рухомої системи клапана з напрацюванням привода до відмови. Виявлено зв'язок швидкості зміни функціональних параметрів електромагнітного клапана з напрацюванням та визначено закон розподілення функціональних параметрів.*

*Connection between the kinetic energy of the moving valve system with the lifelength has been shown. Connection of the functional parameters changes speed and electromagnetic valve non failure operating time was detected. The distributional law of valve functional parameters was obtained.*

### Введение

Анализ результатов отработочных испытаний систем, в состав которых входит электромагнитный клапан (ЭМК) с приводом ДТВ выявил одну общую особенность отказов этих изделий.

В изделиях разных исполнений наиболее массово проявились следующие отказы:

- 1) недостаточный расход через клапан;
- 2) неоткрытие клапана по управляющему сигналу.

Разборка приводов показала, что причиной этих отказов является недопустимая осевая деформация или разрушение стержневых элементов - штоков.

Анализ изломов разрушенных деталей показал, что разрушение носит усталостный характер вследствие воздействия динамических нагрузок.

Анализ разрушенных деталей показал, что в приводах ДТВ разного исполнения изменения технического состояния стержневых элементов под действием циклических нагрузок происходят подобным образом.

При анализе результатов испытаний была выявлена еще одна особенность проявления отказов приводов ДТВ: чем выше показатели быстродействия, тем ниже показатели безотказности и наоборот.

### Результаты исследований

Эти факты послужили основанием связать уровень кинетической энергии подвижной системы привода с наработкой до отказа вследствие усталостного разрушения, т.е. наработка привода до отказа является функцией удельной кинетической энергии подвижной системы (ПС):

$$W = \frac{mV^2}{2} / S,$$

где  $m$  — масса подвижной системы;  $V$  — скорость перемещения ПС;  $S$  — минимальная площадь поперечного стержневого элемента.

В дальнейшем эта гипотеза была неоднократно подтверждена большим объемом испытаний изделий с приводом ДТВ.

При проектировании скорость перемещения ПС должна иметь двустороннее ограничение. Скорость перемещения ПС должна быть не меньше той, которая обеспечивает быстродействие клапана, заданное ТЗ, т.е.:  $V_{ПС} \geq [V]^{ТЗ}$ .

С другой стороны, скорость  $V_{ПС}$  должна быть такой, чтобы в течение заданной наработки не наступало усталостного разрушения стержневого элемента, т.е.:  $V_{ПС} \leq [V]^{неразр}$ , где  $[V]^{неразр}$  — скорость перемещения ПС из условия неразрушения элемента в течение заданной наработки от циклических нагрузок.

Таким образом, задача разработчика при проектировании состоит в том, чтобы обеспечить нахождение  $V_{ПС}$  в диапазоне

$$[V]^{неразр} \geq V_{ПС} \geq [V]^{ТЗ}.$$

Анализ результатов испытаний стержневых элементов в условиях нагружения осевыми ударными циклическими нагрузками показал, что наработка до усталостного разрушения зависит от следующих факторов:

- количества циклов нагружения;
- материала исполнения элементов;
- удельной кинетической энергии перемещения элементов ПС;
- скорости изменения функциональных параметров (ФП) с наработкой.

Скорость изменения ФП, рассчитанная по результатам испытаний ДЭПК: УФ90070М, УФ90086, УФ96414, УФ90084, представлена в таблице 1.

Вид усталостных изломов стержневых элементов показан на рисунке 1. Следует отметить особенности изломов в зависимости от структуры материала. Как правило, изломы деталей из хрупких материалов Вт 5-1 (рисунок 1, а), Ак 4-1 (рисунок 1, б) имеют две характер-

Таблица 1 – Скорость изменения ФП ЭМК с приводом ДТВ в зависимости от удельной кинетической энергии перемещения ПС

Обозначение ЭМК	Удельная кинетическая энергия, Дж/м <sup>2</sup>	Скорость изменения ФП				
		C <sub>Уо</sub> , В/цикл	C <sub>Уз</sub> , В/цикл	C <sub>Уо</sub> , мс/цикл	C <sub>Уз</sub> , мс/цикл	C <sub>л</sub> , мм/цикл
УФ90070М	108	5·10 <sup>-6</sup>	12·10 <sup>-6</sup>	3,0·10 <sup>-6</sup>	8,4·10 <sup>-6</sup>	0,76·10 <sup>-6</sup>
УФ90086М	184	7·10 <sup>-6</sup>	8·10 <sup>-6</sup>	4,4·10 <sup>-6</sup>	7,2·10 <sup>-6</sup>	3,0·10 <sup>-6</sup>
УФ96414	1275	35·10 <sup>-6</sup>	4·10 <sup>-5</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>	1,28·10 <sup>-4</sup>	2,97·10 <sup>-5</sup>
УФ90084	646	23·10 <sup>-6</sup>	2,7·10 <sup>-5</sup>	1,6·10 <sup>-4</sup>	0,78·10 <sup>-4</sup>	1,75·10 <sup>-5</sup>

ные зоны: зона усталостного разрушения и зона долома. Нарушение целостности стержневых элементов из пластичных материалов (ВТ 1-0) происходит вследствие образования микропор и объединения их в макрополости (рисунок 1,в).

Анализ результатов испытаний ЭМК с приводом ДТВ указывает на то, что основной причиной деградиационных изменений в стержневом элементе являются циклические ударные нагрузки. Следовательно, повышение безотказности может быть достигнуто за счет увеличения доли диссипативной энергии при ударе. С этой целью в кинематическую цепочку, передающую исполнительное усилие от привода к затвору, было введено демпфирующее устройство (ДУ) в виде эластичной резиновой шайбы толщиной δ = 1,5 мм.

Эффективность этой меры была проверена испытаниями на изделии УФ96414-010.

Результат введения ДУ:

1. Нарботка до отказа увеличилась многократно с 6500 циклов до 10<sup>6</sup> циклов.

2. На снижение энергии удара указывает и то, что после наработки 10<sup>6</sup> циклов отсутствовало формоизменение головки штока.

На рисунке 2,а показана форма головки штока после 20000 испытаний циклов без демпфирующего устройства; на рисунке 2, б показана такая же деталь после наработки 10<sup>6</sup> циклов с демпфирующим устройством. Как показала последующая проверка времени срабатывания клапана, оно увеличивалось несущественно и составило:

- время открытия  $\tau_{\max}^{\text{откр}} = 21,4 \text{ мс}$ ;
- время закрытия  $\tau_{\min}^{\text{закр}} = 44 \text{ мс}$ .

На практике законы распределения, как правило, не проявляются в чистом виде. Задача исследования часто заключается в том, чтобы выделить из сложного комплекса закономерностей один преобладающий закон распределения функциональных параметров (ФП) ЭМК [1].

Наиболее часто в практических расчетах встречается закон нормального распределения.

Главная особенность нормального закона распределения состоит в том, что он является предельным законом, к которому приближаются другие законы распределения. Так, согласно центральной предельной теореме Ляпунова, плотность вероятности суммы независимых или слабо зависимых равномерно малых слагаемых при неограниченном увеличении их числа как угодно близко приближается к нормальному закону распределения независимо от того, какие законы распределения имеют эти слагаемые [1].

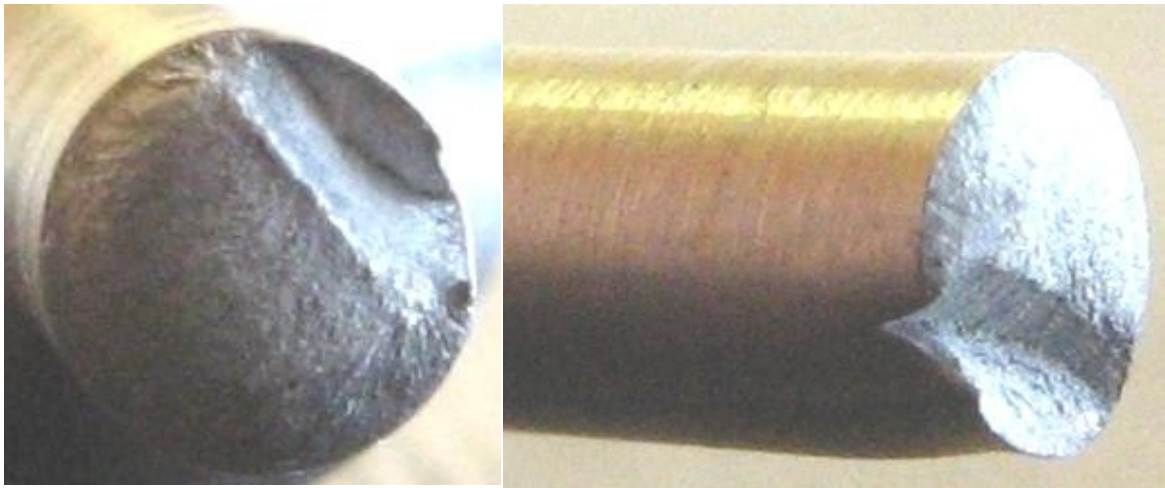
Анализ данных о ФП ЭМК, полученных в процессе испытаний, экспериментально подтверждает справедливость принятого допущения.

Как известно, к нормальному закону распределения могут быть отнесены массивы данных, коэффициенты вариации которых  $v$ , удовлетворяют условию:  $v \leq 0,3$ .

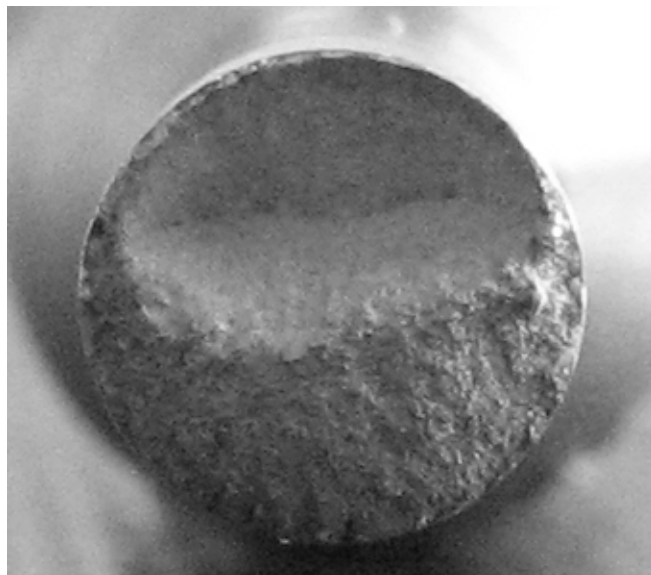
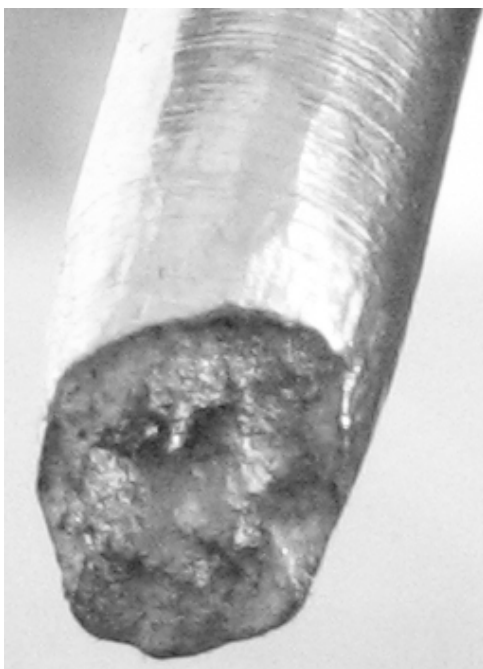
В таблице 2 приведены данные об изменении коэффициентов вариации ФП: минимального напряжения открытия и минимального напряжения закрытия. Объем выборки находился в диапазоне от 5 до 28 образцов.

Таблица 2 – Диапазон изменения коэффициентов вариации ФП ЭМК по результатам испытаний

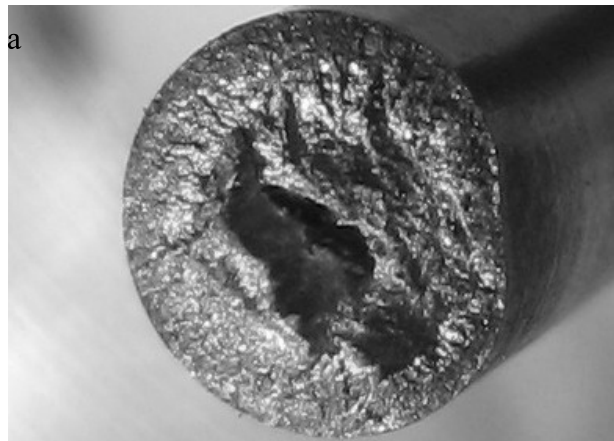
Наименование ФП	Диапазоны изменения коэффициентов вариации ФП	
Минимальное напряжение открытия	среднее $\bar{v}$	0,057—0,24
	максимальное $v_{\max}$	0,11—0,278
Минимальное напряжение закрытия	среднее $\bar{v}$	0,05—0,14
	максимальное $v_{\max}$	0,102—0,178



а

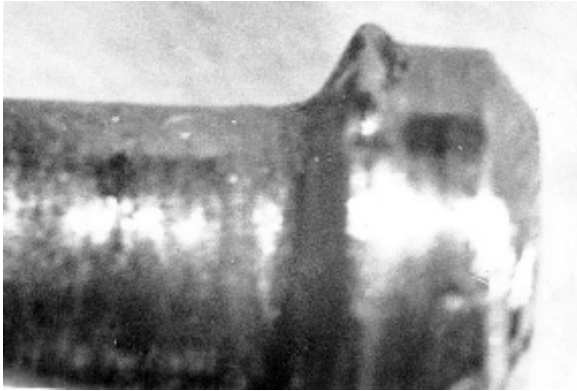


б

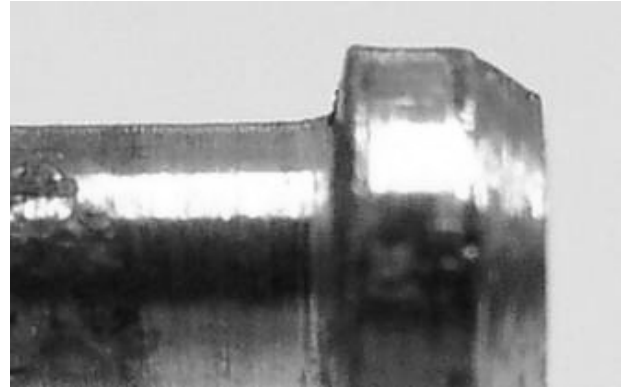


в

Рисунок 1 — Усталостные изломы стержневых элементов:  
а) стержневые элементы из материала Вt5-1; б) стержневые элементы из материала Ак 4-1;  
в) стержневые элементы из материала ВТ1-0.



а



б

Рисунок 2 — Вид головки штока привода ДТВ после воздействия ресурсного нагружения:  
а) подвижная система привода без демпфирующего устройства, наработка — 20000 ц;  
б) подвижная система привода с демпфирующим устройством, наработка — 1000000 ц.

Согласно данным таблицы 2, коэффициент вариации упомянутых ФП не превышал  $\nu = 0,278$ . Нарботка каждого образца составила  $1,4 \cdot 10^6$  циклов.

#### Выводы

Исследование массивов значений ФП по результатам приемо-сдаточных испытаний с помощью критериев согласия Пирсона и Колмогорова дало возможность установить, что распределение значений большинства ФП подчиняется нормальному закону.

Аргументы, приведенные выше, дают основание считать допущение о нормальном законе распределения ФП ЭМК достаточно обоснованным.

#### Литература

1. Барзилович, Е.Ю., Мезинцев, В.Г., Савельев, М.В. Надёжность авиационных систем. — М.: Транспорт, 1980. — 186 с.

*Надійшла 21.09.2012 року*