

К ВОПРОСУ О СОХРАННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

*Д. М. Зекцер, Г. М. Корсунский, В. А. Михайлов,
О. В. Хомицкий*

Харьков

Исправность аппаратуры в процессе хранения имеет большое практическое значение для эксплуатационников, строителей и заводов-поставщиков. За количественную меру сохранности принимается вероятность нахождения аппаратуры в исправном состоянии в течение определенного времени хранения в заданных условиях.

В настоящее время период сохранности часто не указывается в технических условиях на аппаратуру автоматики и телемеханики. Иногда срок хранения на складе приводится в технической документации без обоснования расчетами или испытаниями. Этого нельзя допускать, так как в условиях хранения бывают отказы, вызванные постепенным ухудшением характеристик элементов, входящих в данное устройство.

Поскольку в основном соблюдаются благоприятные условия хранения, целесообразно рассматривать только постепенные отказы, возникающие из-за старения элементов. Внезапные отказы составляют сравнительно малую долю, так как они возникают в результате ударов, резких колебаний температуры, давления и других случайных неблагоприятных воздействий.

В процессе хранения реле постепенные отказы появляются в части контактного давления пружин, давления ведущих пружин на изоляционную планку якоря и ведущих пружин с изоляционным упором, а также в части магнитных характеристик магнитопровода реле. При этом механическое давление уменьшается из-за усталости контактных пружин, находящихся в напряженном состоянии, а коэрцитивная сила увеличивается из-за старения низкоуглеродистой электротехнической стали.

Очевидно, электрические и временные параметры реле $U_{ср}$, $t_{ср}$, $U_{от}$, $t_{от}$ будут изменяться во времени в зависимости от изменения механических и магнитных характеристик реле.

Испытания по хранению электромагнитных реле типа КДР и СР, проведенные в течение пяти лет, показали, что контактное давление пружин, давление ведущих и упорных пружин изменяется со временем, сохраняя первоначальный закон распределения нажатий, близкий к нормальному. Вместе с тем в начальный период хранения наблюдается наибольшая интенсивность отказов, что связано с дефектами производства: недостаточной температурной стабилизацией реле или неудовлетворительным креплением контактных групп (затяжка винтов). Поэтому закон распределения вероятности безотказного хранения для реального промежутка времени не является нормальным.

В качестве приближенной характеристики можно использовать экспоненциальный закон

$$P(t) = e^{-\lambda_{xp}t}$$

со средней постоянной для рассматриваемого промежутка времени t интенсивностью отказов $\lambda_{\text{хр}}$.

Расчет основных показателей, характеризующих сохранность электромагнитных реле, например КДР1, КДР1М, КДР5М, КДР6М, КДР1Ш, КДР5МШ, КДР6МШ, СР, может быть выполнен следующим образом. По статистическим данным, полученным в результате ежегодных измерений характеристик реле, хранящихся на складе, определяем оценку математического ожидания давления контактных пружин

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n},$$

где F_i — давление пружин;

n — число пружин.

Вычисляем оценку среднеквадратичного отклонения давления

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n-1}}.$$

Задаваясь доверительной вероятностью, находим точность оценки математического ожидания

$$\varepsilon = t_{\alpha} \frac{\sigma^*}{\sqrt{n}},$$

где 2ε — длина доверительного интервала;

t_{α} — параметр распределения Стьюдента.

Величина доверительной вероятности α обусловлена возможными техническими и экономическими последствиями неправильного определения диапазона контактного давления.

Принимая $\alpha = 0,95$, находим доверительный интервал

$$F_{\alpha} = (\bar{F} - \varepsilon; \bar{F} + \varepsilon).$$

Задаваясь доверительной вероятностью $\alpha = 0,98$, определяем доверительный интервал среднеквадратичного отклонения [1]

$$J_{\alpha_1-\alpha_2} = \left(\frac{\sigma^*}{q_2} < \sigma < \frac{\sigma^*}{q_1} \right),$$

где

$$q_1 = \sqrt{\frac{\chi_1^2}{n-1}}; \quad q_2 = \sqrt{\frac{\chi_2^2}{n-1}};$$

χ_1^2 и χ_2^2 — значения χ^2 — распределения с $n-1$ степенями свободы, дающие вероятности $\alpha_1 = 0,99$ и $\alpha_2 = 0,01$ соответственно.

Результаты вычислений характеристик закона распределения контактного нажатия реле приведены в табл. 1 и на рис. 1.

По техническим требованиям на указанные реле нижний допустимый предел контактного давления $F_1 = 25$ г, верхний предел $F_2 = 40$ г. Учитывая, что контактное давление распределено по нормальному закону, минимальную и максимальную вероятности нахождения давления в диапазоне (F_1, F_2) в конце каждого года хранения реле находим как

$$P(F_1 < F < F_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^*} \int_{F_1}^{F_2} e^{-\frac{(F-\bar{F})^2}{2(\sigma^*)^2}} dF.$$

Таблица 1

Характеристика	До хранения	Через год хранения	Через 2 года хранения	Через 3 года хранения	Через 4 года хранения
$\bar{F}-\varepsilon$	31,16	30,05	29,74	29,25	28,43
$\bar{F}$	32,2	31,2	30,8	30,3	29,5
$\bar{F}+\varepsilon$	33,04	32,34	31,85	31,35	30,51
$\frac{\sigma^*}{q_2}$	4,77	5,22	4,82	4,89	4,64
σ^*	5,65	6,19	5,71	5,8	5,5
$\frac{\sigma^*}{q_1}$	6,88	7,53	6,95	7,06	6,62

Результаты вычислений представлены в табл. 2 (рис. 1, в).

Таблица 2

Уровень вероятности $P (25 < F < 40)$	До хранения	Через год хранения	Через 2 года хранения	Через 3 года хранения	Через 4 года хранения
Минимальная	0,71	0,65	0,68	0,66	0,65
Максимальная	0,88	0,84	0,87	0,87	0,86

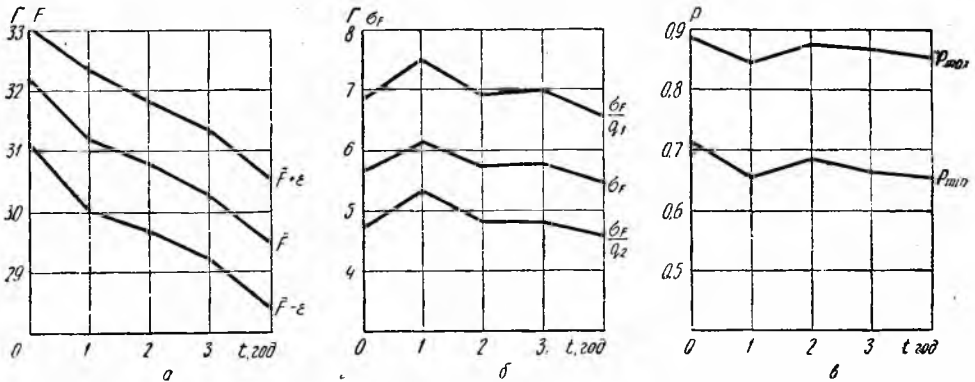


Рис. 1. Изменение характеристик пружин реле.

Среднее значение интенсивности отказов $\lambda_{\text{хр}}$ определяем по формуле

$$\lambda_{\text{хр}} = \frac{n_{\text{отк}}}{Nt} \frac{1}{\text{год}},$$

где $n_{\text{отк}}$ — число пружин, характеристики которых вышли за пределы допуска за время t ;

N — первоначальное число пружин;

t — длительность хранения, в годах.

В результате расчета получено $\lambda_{\text{хр}} = 0,01 \frac{1}{\text{год}}$.

Исследования старения магнитных материалов показали, что реле, выполненные из кремнистой стали марки Э42, не изменяют магнитных и электрических характеристик.

Магнитопровод реле, изготовленный из низкоуглеродистой электротехнической стали Э8÷Э10, постепенно стареет, что проявляется в увеличении коэрцитивной силы, уменьшении напряжения отпускания и коэффициента возврата. Вместе с тем широкое применение низкоуглеродистой электротехнической стали для изготовления всех основных деталей магнитной системы объясняется более высокой индукцией насыщения, лучшими механическими и технологическими свойствами этой стали по сравнению с кремнистой.

Определим надежность магнитной системы как вероятность сохранения магнитных характеристик магнитопровода в заданных пределах в течение заданного времени

$$P_t(H_c) = \int_0^{H_{c. \text{ доп}}} f_t(H_c) dH_c,$$

где $P_t(H_c)$ — вероятность нахождения H_c в заданных пределах в момент времени t ;

$f_t(H_c)$ — плотность распределения H_c в момент времени t ;

$H_{c. \text{ доп}}$ — допустимая номинальная коэрцитивная сила.

Законы распределения коэрцитивной силы и других характеристик близки к нормальному. В табл. 3 даны результаты расчета параметров законов распределения характеристик реле по приведенным выше формулам.

Под магнитным старением обычно понимают увеличение коэрцитивной силы вследствие образования немагнитных выделений определенной степени дисперсности, препятствующих смещению междоменных границ. Коэрцитивная сила нечувствительна к начальным стадиям старения; она начинает повышаться лишь после того, как выделения достигнут величины порядка сотен ангстрем (рис. 2). Приведенная кривая показывает, что мельчайшие ($\sim 100 \text{ \AA}$) частицы, образующиеся в начальных стадиях старения, практически не влияют на коэрцитивную силу.

Кинетика процесса старения при повышенной температуре определяется зависимостью [2]

$$\lg \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{Q}{4,57} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

где τ_1 и τ_2 — продолжительность старения при температуре T_1 и T_2 (°K) соответственно;

Q — энергия активации процесса, кал/ч·атом.

Зная τ_1 , T_1 и T_2 , можно найти время старения τ_2 . Например, если старение в течение 200 ч при 100 °C повышает коэрцитивную силу с 0,6 до 1,7 а/см, то при 20 °C аналогичного повышения коэрцитивной силы следует ожидать через семь лет.

Уменьшить естественное магнитное старение стали можно путем отжига в среде водорода или в вакууме. В результате этого процесса уменьшается усилие удержания якоря в замкнутом состоянии (рис. 3, а) и увеличивается чувствительность реле (рис. 3, б) [3].

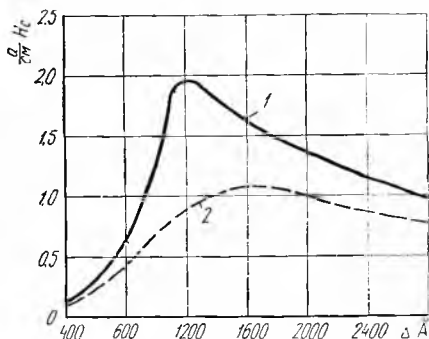


Рис. 2. Зависимость коэрцитивной силы от величины выделений.

1 — обычный отпуск; 2 — отпуск в атмосфере водорода.

Кроме того, устранять старение металла можно добавлением кремния или алюминия в состав низкоуглеродистой электротехнической стали. В результате таких мероприятий коэффициент старения $\frac{\Delta H_c}{H_c}$ снижается более чем в три раза [2].

Проведение этих технологических мероприятий на заводах-изготовителях позволит значительно улучшить магнитные характеристики реле и повысить их надежность.

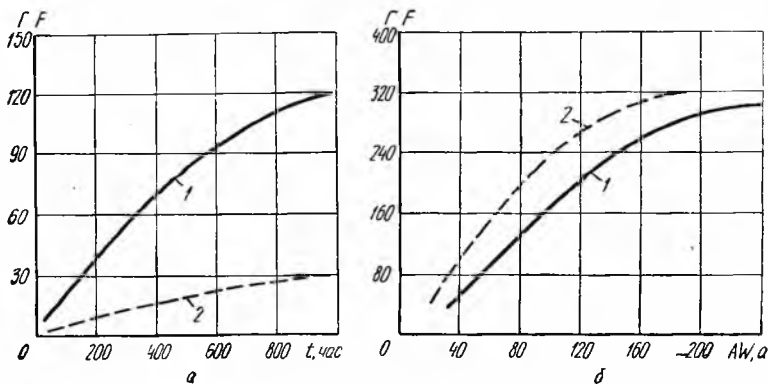


Рис. 3. Старение магнитного материала при различном характере отпуска:

1 — обычный отпуск; 2 — отпуск в атмосфере водорода;
а — усилие отрыва якоря реле в зависимости от времени старения;
б — контактная нагрузка реле в зависимости от AW обмотки.

На основании анализа статистических данных хранения электромагнитных реле указанных типов можно сделать следующие выводы:

Таблица 3

Время замера	$H_c, \text{ а/м}$			$H_c, \text{ а/м}$			$J_{\text{отп}}, \text{ ма}$			K_B		
	Кремнистая электротехническая сталь Э42 (КДР1)			Низкоуглеродистая электротехническая сталь Э10 (СР)			(реле типа СР)			(реле типа СР)		
	$P(H_c < 60)$			$P(H_c < 100)$			$P(J_{\text{отп}} > 3)$			$P(K_B > 0,16)$		
	$\bar{H}_c$	σ_{H_c}		$\bar{H}_c$	σ_{H_c}		$\bar{J}_{\text{отп}}$	$\sigma_{J_{\text{отп}}}$		$\bar{K}_B$	σ_{K_B}	
До хранения	50	3	0,999	90	3,3	0,999	3,1	0,07	0,92	0,2	0,025	0,948
Через 3 года хранения	52	3,1	0,995	95	3,6	0,92	3,0	0,08	0,50	0,17	0,03	0,64
Через 5 лет хранения	55	3,3	0,94	150	8	0	2,0	0,4	0,38	0,1	0,03	0,02

1. Контактное давление в процессе хранения уменьшается постепенно.
2. Максимальная скорость изменения контактного давления и максимальная интенсивность отказов наблюдаются в течение первого года хранения, когда проявляются дефекты производства (плохое стягивание

прокладок и контактных пружин, неудовлетворительная температурная стабилизация и т. п.).

3. Согласно техническим условиям на изготовление указанных типов реле допускается отклонение контактного давления на $\pm 20\%$. При выпуске оно достигает $\pm 15\%$. Так как в течение трех лет хранения контактное давление изменилось на 5%, то этот срок может быть установлен в качестве предельного, обеспечивающего получение полностью работоспособных реле.

4. Чтобы улучшить характеристики изделия, необходимо принимать меры для уменьшения старения материала магнитопровода.

Таким образом, установление обоснованных сроков хранения реле указанных типов возможно на основе анализа результатов расчетов, выполненных в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Шор. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. Изд-во «Советское радио», 1962.
 2. Н. П. Жетвин и др. Технически чистое железо. Металлургиздат, 1962.
 3. Фрай Дж. Р. Конструктивные факторы, влияющие на надежность работы реле. Сб. «Прикладная механика и машиностроение», вып. 2, 1953.
-