

## ОБ ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ УСТАВКИ ТОКА ПЕРЕГРУЗКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Терешин В.Н., д.т.н., проф., Богданова Л.Е.,

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта

Украина, 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7, УкрГАЗТ, кафедра "Электротехника и электрические машины"

*Розглянуто вплив значення струму калібрування автоматичних вимикачів на стабільність уставки струму перевантаження і розроблений метод, безструмового калібрування, що дозволяє підвищити стабільність уставки струму перевантаження.*

*Рассмотрено влияние значения тока калибровки автоматических выключателей на стабильность уставки тока перегрузки и разработан метод бестоковой калибровки, позволяющий повысить стабильность уставки тока перегрузки.*

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из основных элементов, обеспечивающих эффективное функционирование оборудования являются автоматические выключатели (в дальнейшем тексте АВ), которые выполняют функции управления, защиты и контроля потоком электрической энергии. К основным технико-экономическим показателям АВ относится зона разброса защитной характеристики в области токов перегрузки. Наличие зоны разброса защитной характеристики вызывает нестабильность их уставки на токах перегрузки, что может привести к ложному срабатыванию АВ либо к их несрабатыванию в аварийной ситуации [1]. И то и другое недопустимо. Ложное срабатывание ведет к технологическим потерям, а несрабатывание – к возникновению пожароопасной ситуации. Это наносит значительный материальный ущерб.

При производстве АВ на конвейере сборки защитная характеристика устанавливается с помощью калибровки. С целью снижения трудоемкости сборки АВ калибровка, как правило, производится на больших токах перегрузки ( $2I_H \leq I_K \leq 4I_H$ , где  $I_K$  - ток калибровки, а  $I_H$  - номинальный ток АВ). Можно предположить, что такая методика калибровки снижает стабильность срабатывания АВ при малых токах перегрузки равных уставке ( $1.25 - 1.45I_H$ ).

### ЗАДАЧИ ИСЛЕДОВАНИЯ

Для проверки данной гипотезы были использованы методы математической статистики. Так как АВ одного типа выпускаются десятками тысяч в год, то для исследования объем выборки определили методом выборки из бесконечной совокупности. Известно, что если число измерений  $n \geq 20$ , то выборка будет "репрезентативной" и результаты исследований практически хорошо подчиняются нормальному распределению, т.е. при  $n \geq 20$  распределение Стьюдента  $t(n)$  переходит в нормальное распределение.

Поэтому для количественного исследования выбрали пять АВ типа А3716 с  $I_H = 40$  А, откалиброванных при  $I_K = 3I_H$  на одно и то же время срабатывания 40 с. и выполнили по пять измерений времени

срабатывания каждого АВ при токах перегрузки  $1,35 I_H$  (табл.1) и  $1,45 I_H$  (табл. 2). Затем эти же АВ откалибровали током  $I_K = 1,35I_H$  примерно на одно и то же время срабатывания 1000с. и выполнили по пять измерений времени срабатывания каждого АВ при токе перегрузки  $1,35 I_H$  (табл. 3). По каждой таблице было получено  $n = 25$  результатов измерений времени срабатывания АВ. Для каждого неизвестного параметра  $\tau$  при неизвестном  $\sigma$  с надежностью  $P = 0.99$  доверительный интервал для  $\tau$  выбирается

$$\bar{\tau} - t(P; n-1) \frac{S}{\sqrt{n}} < \tau < \bar{\tau} + t(P; n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где  $S = \sqrt{\frac{n}{n-1}} D$  - эмпирический стандарт ( $D$  - дисперсия).

Доверительный интервал для неизвестного параметра  $\sigma$  с надежностью  $P = 0.99$  выбираем

$$S \cdot z_H < \sigma < S \cdot z_b. \quad (2)$$

Значения функции  $t(P; n-1)$  и значения коэффициентов  $z_H, z_b$  при надежности  $P = 0.99$  и значениях степеней свободы  $k = n-1 = 24$  выбираем по таблицам [2] с помощью интерполяции. В результате получили:  $t(0.99; 24) = 2.8334$ ;  $z_H = 0.7254$ ;  $z_b = 1.56$ .

В результате расчетов по (1) и (2) доверительный интервал для  $\tau$  и  $\sigma$  составил соответственно для табл. 1, 2, 3:

$$906 < \tau < 1136 \text{ с.}; \quad 60 < \sigma < 129 \text{ с.};$$

$$504 < \tau < 597 \text{ с.}; \quad 148 < \sigma < 317 \text{ с.};$$

$$975 < \tau < 1067 \text{ с.}; \quad 59 < \sigma < 126 \text{ с.}$$

Расчеты показали, что уменьшение тока калибровки в 2,2 раза с  $3I_H$  до  $1,35I_H$  уменьшает доверительный интервал по времени срабатывания  $\tau$  АВ и по стандартному отклонению  $\sigma$  в 2,5 раза.

Таблица 1

Время срабатывания АВ при  $I = 1.35I_H$  со своими расцепителями

№№ АВ	Время срабатывания, с					Ср. арифм. $\tau_{cp}, c$	Дисперсия $D, c^2$	Станд. отклон. $\sigma, c$	Коэф. вариации $\vartheta, \%$	Размах, с	Эмпирический стандарт $S, c$
	1	2	3	4	5						
1	1083	1158	1260	1219	1221	1188,2	4789,7	69,21	5,82	177	
2	797	887	725	782	710	780,2	4916,7	70,12	8,99	177	
3	870	1048	1100	1018	1005	1008,2	7304,2	83,46	8,48	230	
4	673	645	670	735	695	683,6	1139,8	33,76	4,94	90	
5	1099	1025	1053	1105	1085	1073,4	1136,8	33,72	3,14	80	
	Общее					946,72	39694	199,23	21,04	615	203,3

Таблица 2

Время срабатывания АВ по табл. 1 при  $I = 1.45I_H$ 

№№ АВ	Время срабатывания, с					Ср. арифм. $\tau_{cp}, c$	Дисперсия $D, c^2$	Станд. отклон. $\sigma, c$	Коэф. вариации $\vartheta, \%$	Размах, с	Эмпирический стандарт $S, c$
	1	2	3	4	5						
1	590	612	579	584	587	590,4	162,3	12,74	2,16	33	
2	452	480	500	470	440	468,4	552,8	23,51	5,02	60	
3	650	623	605	600	650	625,6	711,3	26,67	4,25	50	
4	450	425	451	481	438	449	431,5	20,77	4,63	56	
5	675	600	643	575	600	618,6	1592,3	39,9	6,45	100	
	Общее					550,4	6574,75	81,88	14,88	250	82,8

Таблица 3

Время срабатывания АВ3716 при  $I = 1.35I_H$ , откалиброванных током калибровки  $I_K = 1.35I_H$ 

№№ АВ	Время срабатывания, с					Ср. арифм. $\tau_{cp}, c$	Дисперсия $D, c^2$	Станд. отклон. $\sigma, c$	Коэф. вариации $\vartheta, \%$	Размах, с	Эмпирический стандарт $S, c$
	1	2	3	4	5						
1	993	990	987	921	1020	982,5	1343,7	36,66	3,13	99	
2	1045	1005	1023	1031	994	1019,6	413,8	20,34	1,99	51	
3	985	986	941	990	981	976,6	406,3	20,16	2,06	49	
4	1110	1200	1150	1130	1220	1162	2170	46,58	4,0	110	
5	958	967	960	965	970	964	24,5	4,95	0,51	12	
	Общее					1020,9	6269,8	79,18	7,76	299	80,8

Такое же уменьшение доверительного интервала по  $\tau$  и  $\sigma$  наблюдается при увеличении тока срабатывания с 1,35 до 1,45  $I_H$ . Поэтому можно предположить, что если калибровку АВ производить током  $I_K = 1.25I_H$ , то доверительный интервал по  $\tau$  и  $\delta$  при уставке 1,35  $I_H$  уменьшится в 5 раз по сравнению с калибровкой АВ током  $I_K = 3I_H$ .

Однако производители АВ на такое никогда не пойдут, ибо это значительно увеличит трудоемкость и энергоемкость производства АВ. Компромисс может быть найден за счет бестоковой калибровки.

#### РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Известен бестоковый способ калибровки АВ, заключающийся во вращении регулировочных элементов до срабатывания АВ в обесточенном состоянии, а затем в их вращении в обратном направлении на угол  $\alpha$ , соответствующий условию

$$\alpha = 0.5[1.05\alpha_{ГН}(I_0) + 0.95\alpha_{ГВ}(I_1)], \quad (3)$$

где  $I_0 = 1.05I_H$  - ток несрабатывания АВ,  $I_1 = 1.25I_H$  или 1.35  $I_H$  ток срабатывания (это уставка тока перегрузки) (рис. 1) [3].  $t_H$  - регламентированное время срабатывания АВ при уставке тока перегрузки.

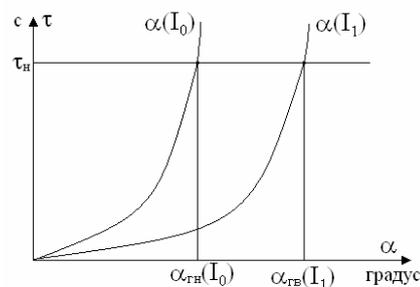


Рис. 1

Причем для получения зависимостей  $\alpha(I_0)$  и  $\alpha(I_1)$  отбирают от 5 до 10 АВ одного типа с одинаковым  $I_H$  и измеряют не менее пяти раз их время сраба-

тивания на каждом фиксированном положении регулировочных элементов и двух значениях тока  $I_0$  и  $I_1$ .

Достоинством этого способа калибровки является то, что ток срабатывания  $I_1$  можно выбрать меньше уставки тока перегрузки, например  $I_1 = 1.15I_H$ .

Недостатком такого способа является большая трудоемкость получения зависимостей  $\alpha(I_0)$  и  $\alpha(I_1)$ , так как число фиксированных положений регулировочных элементов на каждом токе  $I_0$  и  $I_1$  не менее пяти и на каждом положении регулировочных элементов проводится по пять измерений времени срабатывания.

Авторами был разработан метод бестоковой калибровки АВ, позволяющий избавиться от вышеперечисленных недостатков [4].

Исследования показали, что зависимость времени срабатывания  $\tau_c$  АВ от положения  $\alpha$  регулировочных элементов, отсчитанного от  $\alpha_0 = 0$ , хорошо аппроксимируется статистической экспонентой [5]

$$\bar{\tau}_C(I_{II}) = Ae^{b\alpha}, \quad (4)$$

где  $\bar{\tau}_C(I_{II})$  - среднее время срабатывания АВ при конкретном значении  $\alpha$  регулировочного элемента;  $I_{II}$  - конкретный ток перегрузки;  $A$  и  $b$  - коэффициенты, что рассчитываются для тока перегрузки  $I_{II}$ .

Для определения коэффициентов  $A$  и  $b$  линеаризуем выражение (4)

$$\ln \bar{\tau}_C(I_{II}) = \ln A + b\alpha. \quad (5)$$

Зависимость (5) - это уравнение прямой в системе координат  $\{\ln \tau, \alpha\}$ . А так как прямую можно провести через любые две точки, то зависимость (4) можно получить по двум значениям  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  при любых значениях тока перегрузки  $I_{II}$ . Коэффициенты  $A$  и  $b$  при этом определяются по формулам

$$A = \exp\left(\frac{\alpha_1 \ln \bar{\tau}_2 - \alpha_2 \ln \bar{\tau}_1}{\alpha_1 - \alpha_2}\right), \quad (6)$$

$$b = \frac{\ln \bar{\tau}_1 - \ln \bar{\tau}_2}{\alpha_1 - \alpha_2}, \quad (7)$$

где  $\bar{\tau}_1$  и  $\bar{\tau}_2$  - среднее время срабатывания АВ соответственно при положениях регулировочных элементов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Зависимость (4) строится теперь только по двум положениям регулировочных элементов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , что позволит в 2,5 раза уменьшить время на проведение эксперимента.

Сущность разработанного способа бестоковой калибровки АВ заключается в следующем [4].

Отбирают от пяти до десяти АВ одного типа с одинаковыми  $I_H$ . Вращением регулировочных винтов каждый АВ доводят до срабатывания в обесточенном состоянии. Затем вращением регулировочных элементов в обратном направлении в обесточенном состоянии устанавливают у всех АВ угол  $\alpha_1$ . Чаще всего  $\alpha_1 = 270^\circ = 0.75$  оборота. После этого через

каждый АВ пропускают ток несрабатывания  $I_0 = 1.05I_H$  и измеряют время срабатывания каждого АВ. Затем АВ охлаждают до исходной температуры. После чего процесс измерения повторяется. Таких измерений времени срабатывания каждого АВ при  $\alpha = \alpha_1$  проводится пять. После чего через каждый АВ пропускается ток срабатывания  $I_1 = 1.25I_H$  или  $1.35I_H$ . Можно и  $I_1 = 1.15I_H$  и снова производят по пять измерений времени срабатывания каждого АВ при токе перегрузки  $I_1$ .

Затем каждый АВ в обесточенном состоянии вращением регулировочных элементов доводят до срабатывания. После этого вращением регулировочных элементов в обратном направлении в обесточенном состоянии устанавливают в каждом АВ угол  $\alpha = \alpha_2$ . Чаще всего  $\alpha_2 = 450^\circ = 1.25$  оборота. После чего через каждый АВ пропускают поочередно ток несрабатывания  $I_0$  и ток срабатывания  $I_1$  и проводят по пять измерений времени срабатывания АВ по методике, изложенной выше для угла  $\alpha = \alpha_1$ .

По данным эксперимента определяют коэффициенты  $A$  и  $b$  зависимости (4) для двух значений тока перегрузки  $I_0$  и  $I_1$  по формулам

$$A(I_0) = \exp\left(\frac{\alpha_1 \ln \bar{\tau}_2(I_0) - \alpha_2 \ln \bar{\tau}_1(I_0)}{\alpha_1 - \alpha_2}\right), \quad (8)$$

$$b(I_0) = \frac{\ln \bar{\tau}_1(I_0) - \ln \bar{\tau}_2(I_0)}{\alpha_1 - \alpha_2}, \quad (9)$$

$$A(I_1) = \exp\left(\frac{\alpha_1 \ln \bar{\tau}_2(I_1) - \alpha_2 \ln \bar{\tau}_1(I_1)}{\alpha_1 - \alpha_2}\right), \quad (10)$$

$$b(I_1) = \frac{\ln \bar{\tau}_1(I_1) - \ln \bar{\tau}_2(I_1)}{\alpha_1 - \alpha_2}, \quad (11)$$

где  $\bar{\tau}_1(I_0)$  и  $\bar{\tau}_2(I_0)$  - среднее время срабатывания АВ соответственно при положениях регулировочных элементов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и токе  $I_0$ ;

$\bar{\tau}_1(I_1)$  и  $\bar{\tau}_2(I_1)$  - среднее время срабатывания АВ соответственно при положениях регулировочных элементов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и токе  $I_1$ .

Зависимость (4) времени срабатывания АВ от положения регулировочных элементов для токов перегрузки  $I_0$  и  $I_1$  примет вид

$$\bar{\tau}_C(I_0) = A(I_0) \exp[b(I_0)\alpha] \quad (12)$$

$$\bar{\tau}_C(I_1) = A(I_1) \exp[b(I_1)\alpha] \quad (13)$$

Постоянная для экспонент (12) и (13) будет соответственно

$$T_\alpha(I_0) = \frac{1}{b(I_0)} \text{ и } T_\alpha(I_1) = \frac{1}{b(I_1)}.$$

Так как переходный процесс на 95% заканчивается через  $3T_\alpha$ , а через  $4.6T_\alpha$  - на 99%, то верхнее граничное положение регулировочных элементов по средней толерантной зависимости (12) и (13) времени срабатывания АВ от положения регулировочных эле-

ментов составляет соответственно при токах перегрузки  $I_0$  и  $I_1$

$$\bar{\alpha}_\Gamma(I_0) = 4.6T_\alpha(I_0) = \frac{4.6}{b(I_0)}, \quad (14)$$

$$\bar{\alpha}_\Gamma(I_1) = 4.6T_\alpha(I_1) = \frac{4.6}{b(I_1)}. \quad (15)$$

Используя метод наименьших квадратов, определяют разброс значений времени срабатывания АВ при двух положениях регулировочных элементов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и двух значениях тока перегрузки  $I_0$  и  $I_1$  по формулам

$$S_{\tau\alpha}(I_0) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^5 (\tau_{Cji}^{-1} - \bar{\tau}^{-1})^2 (\ln \alpha_j - \ln \bar{\alpha})}{2 \cdot 5 \cdot 5 - 2} \frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^5 (\tau_{Cji}^{-1} - \bar{\tau}^{-1})^2 (\ln \alpha_j - \ln \bar{\alpha})}{\sum_{j=1}^2 (\ln \alpha_j - \ln \bar{\alpha})}}, \quad (16)$$

где  $i$  – порядковый номер АВ;  $j$  – порядковый номер положения регулировочных элементов  $\alpha_j$ ;  $\tau_{Cji}$  – время срабатывания  $i$ -того АВ при угле поворота  $\alpha_j$ ;

$$\bar{\tau}^{-1} = \frac{1}{2 \cdot 5 \cdot 5} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^5 \frac{1}{\tau_{Cji}}; \quad (17)$$

$$\ln \bar{\alpha} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \ln \alpha_j = \frac{1}{2} (\ln \alpha_1 + \ln \alpha_2). \quad (18)$$

По (16) определяют  $S_{\tau\alpha}(I_1)$  для тока  $I_1$ . Исходя из условий проведения эксперимента, определение стандартной ошибки оценивания положения регулировочных элементов  $S_{\tau\alpha}$  не представляется возможным, но возможно ее определение через  $S_{\tau\alpha}$  для токов  $I_0$  и  $I_1$  соответственно

$$S_{\alpha\tau}(I_0) = W(I_0) S_{\tau\alpha}(I_0) \quad (19)$$

$$S_{\alpha\tau}(I_1) = W(I_1) S_{\tau\alpha}(I_1), \quad (20)$$

где  $W(I_0) = \frac{\ln \alpha_1 - \ln \bar{\alpha}_\Gamma(I_0)}{\bar{\tau}_1(I_0)} \quad (21)$

$$W(I_1) = \frac{\ln \alpha_1 - \ln \bar{\alpha}_\Gamma(I_1)}{\bar{\tau}_1(I_1)}. \quad (22)$$

После этого определяют необходимое положение регулировочных элементов

$$\alpha = 0.5[1.05\alpha_{\Gamma H}(I_0) + 0.95\alpha_{\Gamma B}(I_1)] \quad (23)$$

$$\alpha_{\Gamma H}(I_0) = \exp[\ln \bar{\alpha}_\Gamma(I_0) + 2S_{\alpha\tau}(I_0)] \quad (24)$$

$$\alpha_{\Gamma B}(I_1) = \exp[\ln \bar{\alpha}_\Gamma(I_1) - 2S_{\alpha\tau}(I_1)] \quad (25)$$

Значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  для токов перегрузки  $I_0$  и  $I_1$  могут быть как одинаковыми, так и разными.

Например, для АВ типа ВА22-27 с  $I_H = 16$  А для тока перегрузки  $I_0 = 1.05I_H$  и трех положениях регулировочных элементов  $\alpha_1 = 270^\circ$ ,  $\alpha_2 = 360^\circ$  и  $\alpha_3 = 450^\circ$  в соответствии с [3] экспериментально была получена зависимость

$$\bar{\tau}(I_0) = 4.2 \exp(0.009\alpha). \quad (26)$$

В соответствии с разработанным способом для двух положений регулировочных элементов  $\alpha_1 = 270^\circ$  и  $\alpha_2 = 450^\circ$  зависимость (26) имеет вид

$$\bar{\tau}(I_0) = 4.45 \exp(0.008915\alpha). \quad (27)$$

Для положения регулировочного элемента  $\alpha = 360^\circ$  по зависимостям (26) и (27) соответственно получили  $\bar{\tau}(I_0) = 107.28$  с и  $\bar{\tau}(I_0) = 110.2$  с, а экспериментально получили  $\bar{\tau}(I_0) = 118.78$  с.

Как видно из приведенного примера разработанный бестоковый способ калибровки дает хорошее согласование с экспериментом и при этом уменьшается трудоемкость его проведения.

## ВЫВОДЫ

1. Чем больше кратность тока калибровки, тем более нестабильно время срабатывания АВ при малых токах перегрузки, т.е. тем более нестабильна уставка тока перегрузки.

2. Для повышения стабильности уставки тока перегрузки калибровку АВ необходимо проводить током меньше уставки тока перегрузки.

3. С целью достижения компромисса между производителями и потребителями в отношении трудоемкости, калибровку АВ необходимо проводить разработанным методом бестоковой калибровки и током калибровки  $I_K = 1.15I_H$ .

4. Разработанный метод бестоковой калибровки АВ позволит не только повысить стабильность уставки тока перегрузки, но и значительно снизит трудоемкость и энергоемкость производства АВ.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Методологические основы расчета термобиметаллических механизмов электромеханических устройств защиты /В.Н. Терешин, Л.Е. Богданова// Электротехника і електромеханіка, 2006, №6, С. 41-44.
- [2] Л.З Румшиский. Элементы теории вероятностей. – М.: Наука. 1976.
- [3] Патент РФ №2084038. Бестоковый способ калибровки автоматических выключателей с тепловыми расцепителями /Терешин В.Н., Фесенко О.В., Чернов В.А. и др. МПК6 Н01Н 69/01. Бюл. №28, 1998.
- [4] Патент UA №76755. Безструмовий спосіб калібрування автоматичних вимикачів з тепловими розчіплювачами /Терешин В.М., Кривенко Є.М., Богданова Л.Є. и др. МПК (2006) Н01Н 69/00 Н01Н 73/00. Бюл. №9, 2006.
- [5] Патент РФ №2120150. Бестоковый способ калибровки автоматических выключателей с тепловыми расцепителями /Терешин В.Н., Фесенко О.В., Фролов Ю.А. и др. МПК6 Н01Н 69/01. Бюл. №28, 1998.

Поступила 02.10.2007