УДК 621.316.925.45

К ВОПРОСУ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Инж. ВАНЗОВИЧ Э. П., канд. техн. наук САУХАТАС А.-С. С.

Рижский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт имени А. Я. Пельше

Дистанционные защиты получили широкое распространение для защиты высоковольтных линий от междуфазных коротких замыканий [1]. Важнейшие технические свойства дистанционных защит определяются параметрами дистанционных измерительных органов (ДИО) и в наи-

большей степени их характеристиками в комплексной плоскости $\underline{Z}$ (сопротивления). Развитие элементной базы построения ДИО привело к возможностям построения характеристик практически любой формы. При этом возникает вопрос об оптимальной форме характеристик.

Выбор характеристик ДИО в комплексной плоскости сопротивления производится на базе трудоемкого анализа поведения защиты при различных видах коротких замыканий, режимах работы защищаемого объекта и энергосистемы [1]. При этом приходится ограничиваться лишь качественным анализом свойств ДИО. Одним из следствий качественного исследования свойств ДИО можно считать вывод о возможности задания характеристик ДИО в комплексной плоскости сопротивления в виде четырехугольника [2].

Однако задание оптимальных параметров четырехугольника остается затруднительным. Выбор оптимальных параметров характеристики ДИО в комплексной плоскости сопротивления может быть произведен на базе метода статистических испытаний [3, 4] и методов решения многокритериальных задач оптимизации [5].

В качестве критериев оптимизации характеристик ДИО могут быть выбраны критерии вида:

1) вероятность излишних срабатываний $P_и$ при внешних коротких замыканиях;

2) вероятность отказов $P_о$ при КЗ в защищаемой зоне, обоснованная, например, в [3].

В [4] приведены результаты статистических испытаний ДИО с использованием подобных критериев, которые могут быть применены при выборе характеристик. Одним из наиболее сильно влияющих (неблагоприятно) на функционирование ДИО факторов является сопротивление в месте КЗ. Результаты расчета значений критериев $P_и$ и $P_о$ в большой степени зависят от точности задания указанной величины.

В данной работе, в отличие от известных, учтена зависимость переходного сопротивления от тока в месте КЗ [1]. Кроме того, при задании передаваемой по линии мощности в доаварийном режиме, дополнительно учтена зависимость тока нагрузки от соотношения напряжений на шинах подстанций, питающих защищаемую линию [6].

В основу расчетов положена показанная на рис. 1 схема включения защищаемой линии. В качестве случайных величин приняты: эквивалентные сопротивления всех последовательностей $\underline{Z}_{cI}$ и $\underline{Z}_{cII}$ питающих источников, напряжения на шинах подстанций $\overline{U}_I$ и $\overline{U}_{II}$, удаленность короткого замыкания $\underline{Z}_к$, падение напряжения на дуге короткого замыкания $U_д$, угол δ между эквивалентными ЭДС $\dot{E}_I$ и $\dot{E}_{II}$.

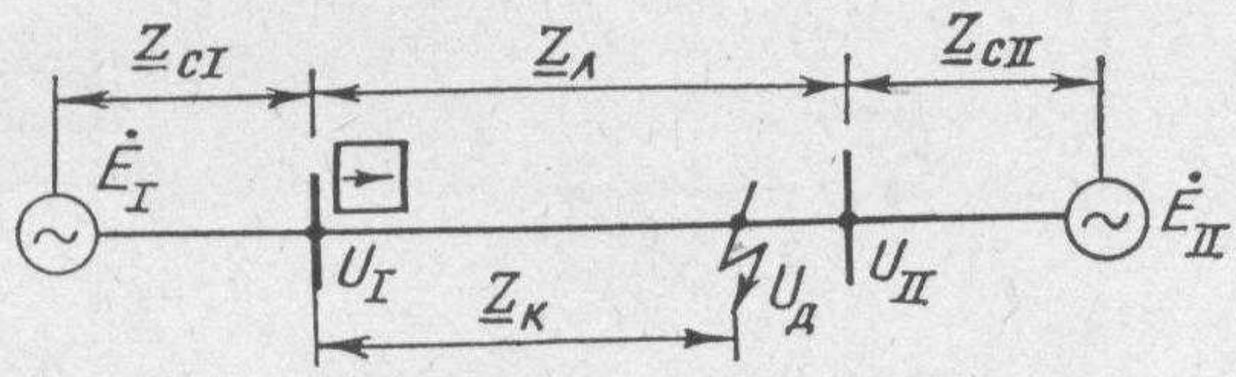

Рис. 1. Схема электропередачи

При расчетах для большинства случайных величин, согласно предложению [3], принят равномерный закон распределения. Его использование в условиях решаемой задачи означает принятие требования одинаково эффективной работы ДИО с различными характеристиками при любом сочетании случайных параметров, влияющих на их функционирование. Такое требование при наличии значительных трудностей сбора информации о статических свойствах случайных параметров представляется приемлемым, особенно на начальном этапе развития методов статистической оптимизации устройств релейной защиты. В табл. 1 представлены пределы изменения параметров.

Таблица 1

Параметр	Диапазон изменения	
	модуля	угла
$\underline{Z}_{cI1} = \underline{Z}_{cI2}$ $\underline{Z}_{cII1} = \underline{Z}_{cII2}$	3—40 Ом	70—90°
$\underline{Z}_{cI0}$ $\underline{Z}_{cII0}$	(0,5—2) Z_{cI1} (0,5—2) Z_{cII1}	80—90°
$U_д$ $R_{пз}$	(0—0,15) $U_н$ (0—15) Ом	0
$\underline{Z}_{л1} = \underline{Z}_{л2}$	—	70—80°
$\underline{Z}_{л0}$	$3Z_{л1}$	80—90°
δ	—	—90 —+90° —60 —+60° —30 —+30°

В табл. 1 обозначения соответствуют рис. 1, кроме того:

$U_н$ — номинальное линейное напряжение;

$R_{пз}$ — переходное сопротивление на землю, дополнительные индексы при сопротивлениях $\underline{Z}_{cI}$; $\underline{Z}_{cII}$; $\underline{Z}_л$ соответствуют прямой, обратной или нулевой последовательностям.

Диапазон изменения падения напряжения на дуге принят с учетом результатов исследований свойств дуги [7, 2]. Модули напряжений U_I и U_{II} приняты случайными величинами, имеющими нормальный закон распределения с параметрами: математическое ожидание $M[U_I] = M[U_{II}] = U_н$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma[U_I] = \sigma[U_{II}] = 0{,}033U_н$, что соответствует разбросам напряжений в диапазонах ±10 % от номинального значения.

Производилось статистическое моделирование функционирования ДИО при всех видах КЗ как на защищаемой линии, так и при внешних КЗ («за спиной» и в прямом направлении). Для каждого вида КЗ проводилось по 2 500 статистических опытов. При расчете вероятностей отказов $P_о$ и излишних срабатываний $P_и$ ставилось требование срабатывания ДИО при внутренних междуфазных КЗ и несрабатывания при всех видах внешних КЗ. Указанные вероятности рассчитаны с учетом статистической частоты различных видов КЗ (5 % — трехфазные КЗ, 10 % — двухфазные, 20 % — двухфазные на землю).

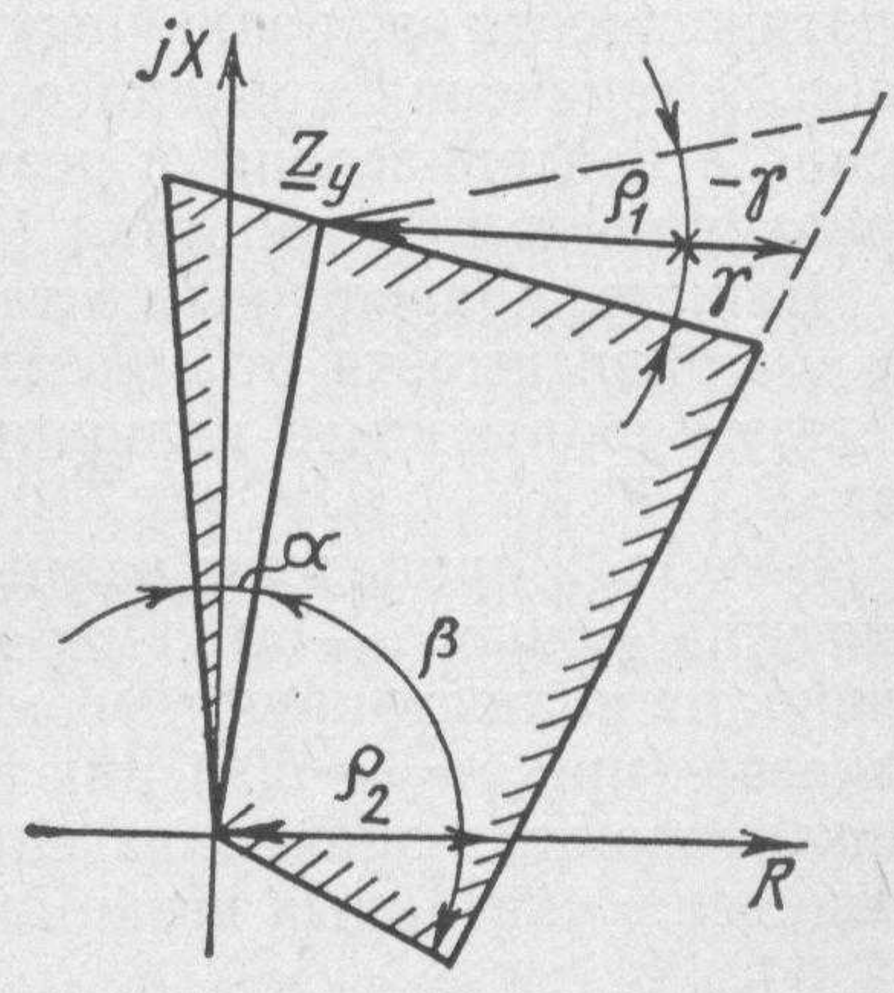

Рис. 2. Оптимизируемые параметры

Форма характеристики может быть задана при помощи параметров α, β, ρ_1, ρ_2, γ (рис. 2). Углы α, β определяют наклоны соответственно левой и нижней границ характеристики по отношению к сопротивлению защищаемой линии $\underline{Z}_л$ (на рис. 2 показано сопротивление уставки $\underline{Z}_у$). Величины ρ_1 и ρ_2 определяют соответственно расстояния правой границы характеристики от конца вектора сопротивления

уставки $\underline{Z}_у$ и от начала координат. Угол γ определяет наклон верхней границы характеристики по отношению к горизонтали.

В процессе расчетов найдено, что при варьировании параметров α в диапазоне от 10 до 25° и β — от 115 до 155° значения $P_и$ и $P_о$ практически не меняются (при условии варьирования δ в диапазоне от —90 до +90°). Таким образом, параметры α и β могут быть выбраны в указанных диапазонах. Назовем найденные диапазоны зонами нечувствительности. Аналогичные зависящие от длины защищаемой линии и представленные на рис. 3 зоны нечувствительности имеют и параметры ρ_1 и ρ_2.

При известной длине защищаемой линии и выборе параметров ρ_1 и ρ_2 внутри представленных на рис. 3 диапазонов практически отсутствует зависимость значений критериев эффективности $P_и$ и $P_о$ от выбранных значений ρ_1 и ρ_2. Сказанное не соблюдается лишь для самых коротких линий (область, отмеченная W на рис. 3). В этом случае выбор ρ_2 влияет на значения критериев $P_и$ и $P_о$ и, следовательно, указанные параметры должны быть выбраны с точки зрения принятия компромиссного решения с учетом «веса» критериев $P_и$ и $P_о$. Выбор «весов» может быть произведен, например, методом экспертных оценок [5] с учетом народнохозяйственного ущерба, вызванного излишними срабатываниями или отказами.

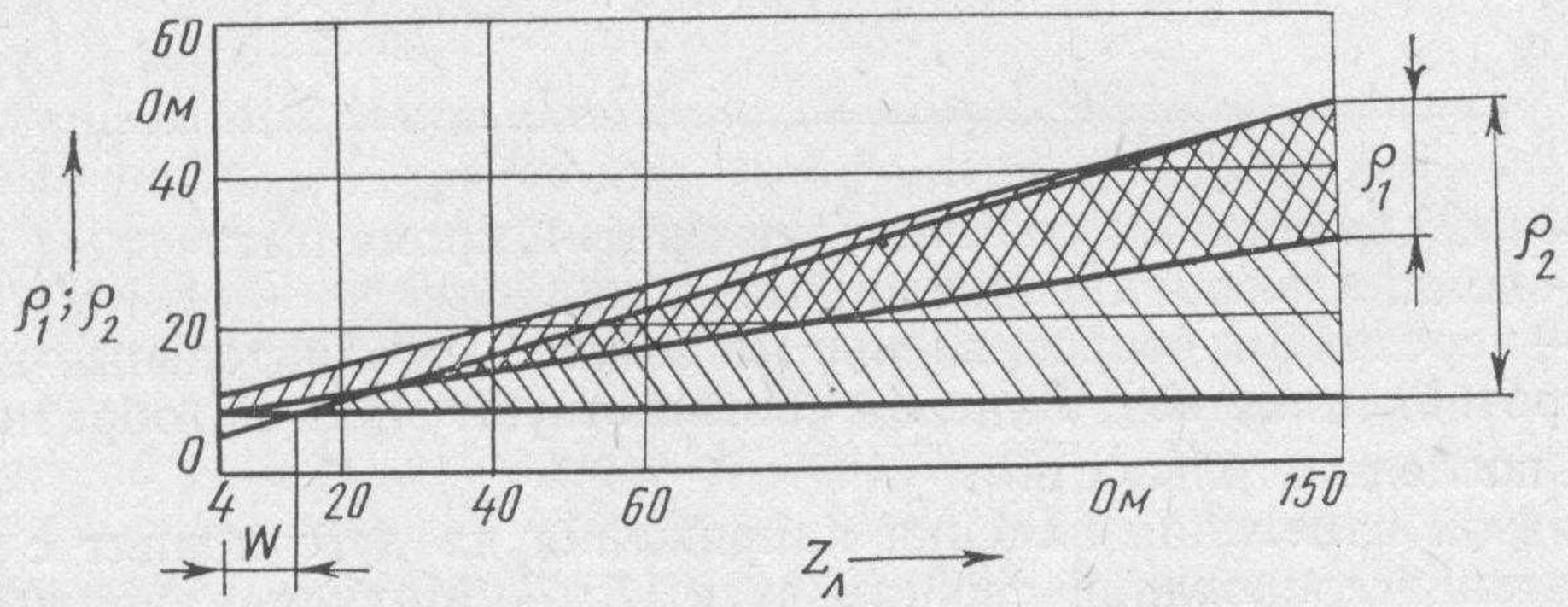

Рис. 3. Границы выбора параметров ρ_1 и ρ_2. Результаты получены при изменении угла δ от —90 до +90°

Такое же решение приходится принимать и при выборе γ, от которого зависят оба критерия $P_и$ и $P_о$. Эта зависимость для линий различной протяженности и различных пределов изменения углов δ сведена в табл. 2 (значения критериев представлены в процентах), для сопоставления в ней приведены и результаты расчета $P_и$ и $P_о$ для круговой направленной характеристики (отмечено КН).

Данные, приведенные в табл. 2, облегчают выбор значений параметра γ в зависимости от приемлемого для конкретной линии соотношения между вероятностью излишних срабатываний $P_и$ и вероятностью отказов $P_о$.

В табл. 2 приведены данные и для практически неприемлемого значения угла, равного —60°. При этом полученные значения критериев эффективности иллюстрируют возможность практически полного исключения отказов (при $\gamma = -60°$) или излишних срабатываний (при $\gamma = 60°$) при фиксированных значениях параметров характеристики α, β, ρ_1, ρ_2, находящихся в указанных выше диапазонах значений.

ВЫВОДЫ

1. Варьирование параметров α, β, ρ_1, ρ_2, частично задающих характеристики ДИО (рис. 2), внутри выявленных в статье диапазонов практически не влияет на эффективность функционирования анализируемых устройств, что позволяет рекомендовать выбор значений этих параметров соответствующими найденным диапазонам.

Таблица 2

Отношения вероятностей излишних срабатываний и отказов ДИО $\frac{P_и(\%)}{P_о(\%)}$

$Z_{л1}$, Ом	δ, град	КН	Четырехугольная характеристика с различными углами наклона γ, град						
			60	45	30	20	10	0	—60
4—20	±90	0,7/10,1	0/15,7	0,2/10,4	0,5/7,7	0,8/5,7	1,0/4,7	1,3/3,3	13,8/0,3
	±60	0,2/10,6	0/17,9	0/11,7	0,1/8,5	0,2/5,6	0,5/4,4	0,9/2,6	15,8/0,1
	±30	0/11,1	0/19	0/13,1	0/8,6	0/5,5	0,1/3,1	0,5/1,4	17,9/0,1
20—40	±90	2,3/4,2	0,2/9,1	0,3/6,4	0,8/4,9	1,1/3,9	1,6/2,9	2,2/2,4	19,0/0,3
	±60	0,9/4,1	0/11,4	0,1/7,9	0,2/4,9	0,5/3,5	1,0/2,4	1,6/2,0	22,7/0
	±30	0,1/4,1	0/12,4	0/8,2	0/5,3	0,1/3,4	0,4/2,2	1,0/1,3	24,5/0
40—60	±90	6,5/3,8	0,2/8,6	0,7/6,3	1,2/4,7	1,9/4,0	2,4/3,2	3,3/2,7	23,5/0,6
	±60	2,1/3,9	0/9,7	0,1/6,9	0,5/4,7	0,8/3,7	1,6/2,7	2,5/1,9	26,9/0
	±30	0,5/3,6	0/10,8	0/8,0	0/4,8	0,1/3,5	0,7/2,0	1,5/1,0	30,6/0
60—150	±90	14,5/3,1	1,2/7,3	2,1/5,5	2,9/4,1	3,9/3,6	5,1/3,0	6,7/2,6	27,2/0,7
	±60	4,2/3,2	0/8,6	0,3/6,2	1,5/4,4	2,5/3,4	3,4/2,6	5,2/2,0	33,2/0,2
	±30	1,1/2,8	0/9,8	0/6,6	0/4,2	0,3/2,8	1,6/2,0	3,7/1,1	37,3/0,2

2. Приведены соотношения вероятностей излишних срабатываний и отказов $P_и/P_о$ для линий электропередачи разной длины при различных значениях передаваемых мощностей, что облегчает выбор параметра характеристики γ.

3. При сохранении вероятностей излишних срабатываний ДИО с четырехугольной характеристикой и ДИО с круговой направленной характеристикой первые обеспечивают в среднем примерно в два раза меньшую вероятность отказов.

4. В случае сохранения вероятностей отказов ДИО с четырехугольной характеристикой и ДИО с круговой направленной характеристикой первые обеспечивают в среднем примерно в три раза меньшую вероятность излишних срабатываний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фабрикант В. Л. Дистанционная защита.— М.: Высш. школа, 1978.— 215 с.
2. Лиелпетерис Э. Я., Ванзович Э. П. Предельная область срабатывания реле сопротивления по условию чувствительности к дуговым замыканиям // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук.—1976.— № 6.— С. 41—46.
3. Саухатас А.-С. С., Фабрикант В. Л., Шабанов В. А. Многофазные реле сопротивления и их сопоставление методом статистических испытаний // Электричество.—1983.— № 10.— С. 45—49.
4. Аржанников Е. А. Статистические испытания характеристик измерительных органов первых ступеней дистанционных защит // Электрические станции.—1982.— № 1.— С. 60—62.

5. Растригин Л. А. Системы экстремального управления.— М.: Наука, 1974.— 630 с.
6. Лиелпетерис Э. Я., Ванзович Э. П. Области селективной работы реле сопротивления // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений).— 1977.— № 9.— С. 15—19.
7. Майкопар А. С. Дуговые замыкания на линиях электропередачи.— М.— Л.: Энергия, 1965.—200 с.

Представлена кафедрой
автоматизированных электрических систем

Поступила 17.02.1986
После доработки 2.04.1988