

УДК 621.316.925

Многофазные реле сопротивления и их сопоставление методом статистических испытаний

САУХАТАС А-С. С., канд. техн. наук,
ФАБРИКАНТ В. Л., доктор техн. наук, ШАБАНОВ В. А., канд. техн. наук

Рижский политехнический институт

Для защиты линий электропередач 110—220 кВ от коротких замыканий (к. з.) на землю в СССР в основном применяют токовые ступенчатые защиты нулевой последовательности [1], имеющие, однако, существенные недостатки, все более проявляющиеся с развитием и усложнением энергетических систем. Применение дистанционного принципа защиты ограничено главным образом низкими показателями технического совершенства реле сопротивления. Реле сопротивления классического исполнения включаются на токи и напряжения, соответствующие петле короткого замыкания, при этом основными факторами,

влияющими на функционирование реле, являются переходное сопротивление в месте к. з. и ток доаварийного режима. В случае применения дистанционного принципа при защите от к. з. на землю, сопровождающихся значительными переходными сопротивлениями, реле сопротивления указанного типа оказываются малоприменимыми как по селективности срабатывания при внутренних к. з., так и по селективности несрабатывания при внешних замыканиях [1].

За последние годы резко вырос интерес к многофазным реле сопротивления (МРС), основанным на сравнении (по фазе или

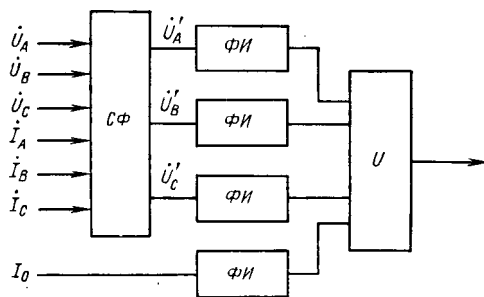


Рис. 1. Структурная схема МРС с регулируемой формой характеристики: форма характеристики меняется путем изменения параметров формирователей импульсов; СФ — схема формирования компенсированных фазных напряжений; ФИ — формирователи импульсов; И — логический элемент

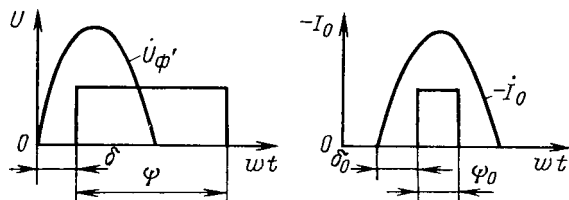


Рис. 2. Импульсы, формируемые формирователями импульсов: а — из \dot{U}'_{ϕ} ; б — из \dot{I}_0

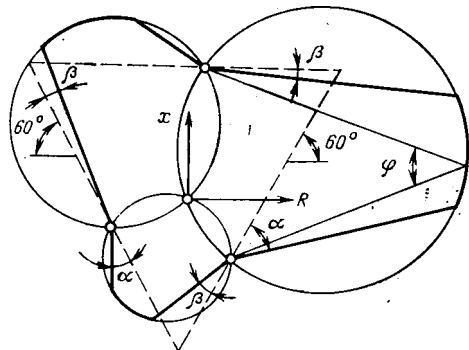


Рис. 3. Характеристика МРС по структурной схеме рис. 1

по амплитуде) нескольких электрических величин, сформированных из напряжений и токов всех трех фаз защищаемого объекта. Известно значительное число вариантов построения таких реле [2—5]. Эти реле по сравнению с однофазными обладают следующими основными особенностями: реагируют на к. з. нескольких видов; имеют лучшие характеристики по селективности при внешних коротких замыканиях. При этом их следует сравнивать с теми однофазными реле, которые включены на напряжения и токи неповрежденных фаз, так как неселективное действие этих реле при внешних коротких замыканиях вызывает неселективное действие защиты [2].

Сложность анализа, которая иногда упоминается как недостаток трехфазных реле, в равной мере относится и к анализу указанных однофазных реле.

Представляет интерес и разработка МРС, предназначенных для защиты от междуфазных к. з., так как однофазные реле сопротивления могут работать неправильно при наложении качаний на внешние к. з., а существующие блокировки при качаниях выводят реле из действия с задержкой. Данная статья базируется на примерах МРС, предназначенных для защиты от однофазных к. з. на землю и посвящена вопросам анализа, сопоставления и оптимизации этих устройств.

Алгоритмы функционирования и методы анализа многофазных реле сопротивления. Большинство из известных МРС использует в качестве сравниваемых электрических величин три компенсированных фазных напряжения:

$$\dot{U}'_{\phi} = \dot{U}_{\phi} - (\dot{I}_{\phi} + k\dot{I}_0) Z_{\Sigma} \quad (1)$$

где \dot{U}'_{ϕ} — компенсированное фазное напряжение, \dot{U}_{ϕ} , \dot{I}_{ϕ} , \dot{I}_0 — фазное напряжение, фазный ток и ток нулевой последовательности соответственно; k — коэффициент компенсации. В ряде реле используется дополнительно и ток нулевой последовательности \dot{I}_0 . Сравниваются указанные величины по фазе.

В основе всех МРС лежат простые по сути алгоритмы функционирования схем сравнения электрических величин. Производится или замер угла, охватывающего пучок векторов \dot{U}'_{ϕ} и \dot{I}_0 , или определяется порядок чередования векторов. Несколько более сложной выглядит математическая формулировка условий срабатывания. Как показано в [2], условия срабатывания (критерии срабатывания) схем сравнения могут быть сформулированы в виде системы алгебраических неравенств.

Наиболее широкие возможности представляет алгоритм сравнения по фазе трех компенсированных фазных напряжений вида (1) и тока нулевой последовательности. Структурная схема такого измерительного органа дана на рис. 1; рис. 2 поясняет функционирование формирователей импульсов, а на рис. 3 дана характеристика реле. Характеристика задается параметрами α ; β , φ , связанными с параметрами импульсов соотношениями: $\alpha = \delta_0 + \varphi_0$; $\varphi = 240^\circ - \psi$; $\beta = 180^\circ + \delta_0$. Характеристика построена при условии отсутствия тока доаварийного режима. Угол β наиболее удобно задавать введением задержки на выходе МРС [5]. Условия срабатывания схемы сравнения этого устройства можно записать в виде системы неравенств:

$$\arg \dot{E}_j + \delta_j < \arg \dot{E}_i + \delta_i < \arg \dot{E}_j + \delta_j + \psi_j \quad (2)$$

где $j = 1, 2, 3, 4$; $i = 1, 2, 3, 4$; \dot{E}_j , \dot{E}_i — сравниваемые по фазе синусоидальные электрические величины ($\dot{E}_1 = \dot{U}'_A$; $\dot{E}_2 = \dot{U}'_B$; $\dot{E}_3 = \dot{U}'_C$; $\dot{E}_4 = -k\dot{I}_0$); \arg — угол комплексной величины; δ_j и ψ_j — параметры импульсов, физическая суть которых ясна из рис. 2.

Для срабатывания МРС необходимо и достаточно, чтобы условие (2) выполнялось для всех j хотя бы при одном i . Условие (2) выполняется в случае, если j -й импульс начинается раньше и кончается позднее, чем начинается i -й импульс.

Условия срабатывания (2) и структурная схема рис. 1 обобщают ряд МРС, отличающихся между собой способами формирования импульсов из компенсированных фазных напряжений и тока \dot{I}_0 [2—4]. В частности, реле [3] и реле с треугольной характеристикой [4] могут быть описаны условиями (2) и представлены структурной схемой рис. 1. Реле [3] формирует импульсы длительностью π , а реле [4] из величины $k\dot{I}_0$ — короткий импульс. Каждая из сравниваемых величин есть функция значительного числа переменных (удаленность к. з., переходное сопротивление, параметры, характеризующие режим энергосистемы и положение защищаемого объекта в энергосистеме). Следовательно, условия срабатывания (2) (заменяя знак неравенства на знак равенства) можно рассматривать как описывающие границы области срабатывания в многомерном пространстве параметров, влияющих на функционирование МРС.

Приняв целый ряд допущений [2], главными из которых являются неучет токов нагрузки в доаварийном режиме при анализе влияния переходного сопротивления в месте к. з. и неучет переходного сопротивления при анализе влияния токов нагрузки, можно свести анализ функционирования МРС к двумерному пространству, например, к традиционной для анализа дистанционных измерительных органов плоскости — плоскости сопротивления петли короткого замыкания, или к другим плоскостям. Такой достаточно громоздкий анализ позволяет получить качественные представления о влиянии главных факторов на функционирование МРС. К наиболее значительным достижениям, полученным указанным путем, следует отнести предложения о структуре улучшения МРС, к которым относятся и МРС по схеме рис. 1, реализующее условия (2). Сложность анализа заставила вести поиск путей его автоматизации. Разработаны алгоритмы [6 и 7], позволяющие использовать ЭВМ для построения характеристик МРС в комплексной плоскости сопротивления. Однако они не снимают трудностей, связанных с выбором варианта построения МРС, с оптимизацией его параметров. Эти трудности обусловлены зависимостью характеристик от многих параметров и отсутствием однозначной связи между формой характеристики и эффективностью МРС. Во многом эти трудности снимаются при использовании описываемого ниже подхода к оптимизации устройств релейной защиты (УРЗ), основанного на статистических позициях и использовании метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) [8].

Критерии эффективности многофазных реле сопротивления и пути их определения. К устройствам релейной защиты предъявляется небольшое число основных требований [1]. Статистический подход позволяет поставить в соответствие этим требованиям небольшое число критериев эффективности вида: вероятность отказа срабатывания при одном требовании срабатывания (внутреннем коротком замыкании) $P_{отк}$; вероятность излишнего срабатывания при одном требовании несрабатывания (внешнем коротком замыкании) $P_{из.ср}$. Связь между названными критериями эффективности функционирования МРС и случайными и неслучайными факторами, влияющими на их работу, определяется функционалом вида:

$$P = \int \int \dots \int_{(D)} \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, dx_2, \dots, dx_n, \quad (3)$$

где n — число влияющих факторов; x_i — i -й влияющий фактор; $\int \dots \int$ — n -кратный интеграл; D — n -мерная область существования x_1, x_2, \dots, x_n , неудовлетворяющих условию срабатывания при внутренних к.з. (в случаях определения $P_{отк}$) или область существования x_1, x_2, \dots, x_n , удовлетворяющих условию срабатывания при внешних к.з. (в случаях определения $P_{из.ср}$).

Определив значения критериев эффективности указанного вида, следует выбрать вариант построения устройства, соответствующий минимальным значениям критериев. В ряде случаев этот выбор из-за отсутствия достаточной информации об ущербах, возникающих при неправильном функционировании реле, представляет собой сложную задачу. На первом этапе решения этой задачи, знание значений критериев позволяет отбросить неконкурентоспособные варианты (путем построения множества Парето [9]).

Для решения задачи сопоставления вариантов выполнения дистанционных измерительных органов в качестве глобального критерия эффективности возможно использование характеристики разброса (среднеквадратического отклонения или дисперсии) конца зоны рассматриваемого устройства [2]. Конец зоны рассматривается как случайная величина, принимающая при конкретном сочетании случайных факторов, влияющих на функционирование устройства, значение, равное длине отрезка линии, защищаемого данным устройством. Определение среднеквадратического отклонения конца зоны σ_z позволяет свести задачу сопоставления вариантов МРС к типу однокритериальных задач оптимизации и выбрать лучший вариант без привлечения информации об ущербах от неправильного функционирования МРС. При одном и том же значении среднеквадратического отклонения (дисперсия) уменьшение $P_{отк}$ за счет увеличения $P_{из.ср}$ или наоборот всегда возможно изменением уставки Z_y в (1). Определение среднеквадратического отклонения конца зоны сводится к вычислению интеграла типа (3) с условной подынтегральной функцией. Из-за сложности подынтегральной функции, высокой мерности интеграла, сложности математического описания области интегрирования использование выражений типа (3) как для определения вероятностей срабатывания, так и для критериев типа σ_z , возможно лишь для простейших случаев [10] либо становится возможным ценою значительных допущений. Для вычисления же значений указанных критериев наиболее рационально использование метода статистических испытаний (Монте-Карло), реализуемого на ЭВМ.

Метод статистических испытаний как инструмент анализа и оптимизации устройств защиты. На рис. 4 дана структура алгоритма, состоящая из двух основных частей: 1) генератора совокупности случайных чисел, имеющих распределение, идентичное закону распределения параметров, определяющих функционирование МРС; 2) математической модели анализируемого МРС. При построении второго блока благодаря анализу работы МРС и УРЗ значительных затруднений не возникает. Отметим, что упрощению математических моделей МРС и УРЗ в целом, способствуют и достижения в области изготовления элементов радиоэлектроники, добротные параметры которых позволяют практически без погрешностей реализовать заданный алгоритм. Отмеченный факт приводит к тому, что при построении математических моделей функционирования УРЗ во многих случаях можно не считаться с температурными погрешностями, разбросом параметров и др., а ограничиваться лишь описанием самого алгоритма.

При необходимости учета этих факторов можно использовать имеющиеся данные о статистических свойствах указанных факторов, которые необходимы для построения генератора случайных чисел.

Для построения первого блока необходима информация о статистических свойствах случайных величин, влияющих на функционирование УРЗ. В случае, если производится оптимизация алгоритмов, указанными величинами являются токи и напряжения, подводимые к УРЗ. Получение такой информации при помощи регистрирующей аппаратуры затруднено. Эти затруднения возникают из-за низкой интенсивности поврежденных защищаемых объектов. Кроме того, для анализа сложных защит требуется информация о статистических свойствах токов и напряжений в разных местах энергосистемы. Имеющиеся в энергосистемах регистрирующие осциллографы плохо приспособлены для сбора необходимой информации (большие погрешности при обработке осциллограмм). Все сказанное заставляет искать обходной путь. Таким может быть путь, основанный на использовании хорошо разработанной методики расчета токов и напряжений при повреждениях в энергосистеме.

В настоящее время эксплуатируются хорошо проверенные программы, позволяющие задать место и вид к.з. в сложной энергосистеме и определить токи и напряжения, подводимые к исследуемому УРЗ. Для этого случая в структурную схему анализа УРЗ методом статистических испытаний, приведенную на рис. 4, дополнительно вводится блок, ограниченный штриховой линией и представляющий собой математическую модель функционирования защищаемого объекта, описывающую функционирование однородных объектов, для защиты которых проектируется УРЗ, например, ВЛ определенного класса напряжения. Рассмотрим основные вопросы, связанные с построением специфического для рассматриваемого метода блока генератора системы случайных чисел, основанного на генерировании равномерно или нормально распределенных псевдослучайных чисел. Такие генераторы входят в состав библиотек стандартных программ. При помощи их можно получить (например, на основе метода Неймана [11]) случайные числа с произвольным законом распределения. Легко получить и случайные числа, подчиненные распределениям Джонсона [11], которые хорошо аппроксимируют разнообразные законы распределения.

Статистические свойства величин, определяющих функционирование многофазных реле сопротивления. Значительные трудности возникают при сборе и обработке статистических данных о параметрах энергетической системы, в которой находится защищаемый объект. В первую очередь это относится к переходным сопротивлениям в месте к.з. и особенно при замыканиях на землю. На основании обработки осциллограмм токов и напряжений в двух сторон ВЛ при реальных к.з. сети 330 кВ ОДУ Северо-Запада была получена гистограмма переходных сопротивлений R_z в месте к.з. Она не противоречит гипотезе о том, что величина R_z подчиняется равномерному закону распределения в диапазоне от 0 до 15 Ом. Однако недостаточный статистический материал (50 осциллограмм) и значительные ошибки обработки осциллограмм не позволяют без

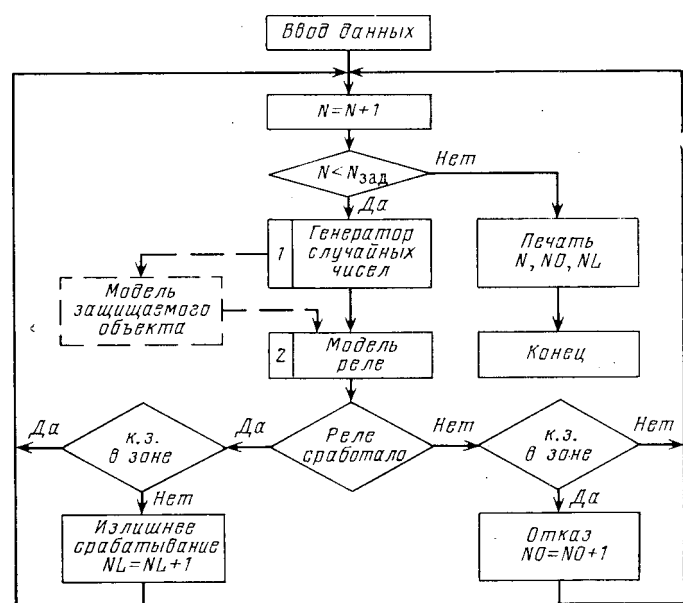


Рис. 4. Алгоритм проведения статистических испытаний МРС на ЭВМ

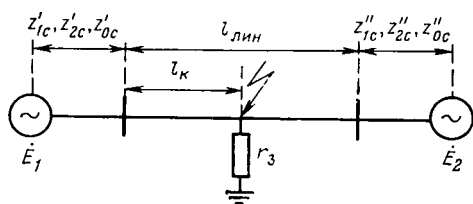


Рис. 5. Схема модели энергосистемы

оговорочно принять эту гипотезу. Величина $l_{к}$ подчинена равномерному закону распределения [10], что достаточно обосновано как с теоретико-вероятностной, так и статистической точек зрения. В [10] показано, что во многих случаях равномерный закон распределения может быть принят и для описания распределения эквивалентных сопротивлений $z_{1с}$, $z_{2с}$, $z_{0с}$ (см. рис. 5, где $\varphi_с = \arg \dot{E}_1 / \dot{E}_2$). Коэффициент корреляции между величинами $z_{1с}$ и $z_{2с}$ практически равен единице. Наблюдается сильная корреляционная связь и между величинами $z_{1с}$ и $z_{0с}$. Коэффициент корреляции между этими величинами (полученный из статистических данных для ВЛ 330 кВ по ОДУ Северо-Запада) равен 0,74.

Качественный анализ режимов энергосистемы показывает, что между эквивалентными сопротивлениями систем сильной корреляционной связи не существует; на основании такого же анализа можно принять, что и $\varphi_с$ распределен по равномерному закону в пределах статической устойчивости. Приведенные здесь данные о свойствах случайных величин, определяющих эффективность функционирования УРЗ, не являются вполне обоснованными со статистической точки зрения, могут и должны в дальнейшем уточняться. Отметим, что сильным аргументом в пользу принятия равномерного закона распределения для всех величин является учет влияния принятого допущения на результат расчета. Принятие указанного допущения эквивалентно требованию одинаково хорошей работы УРЗ при всех возможных сочетаниях значений влияющих факторов. Кроме того, выбор критериев, определенных согласно (3) с целью принятия оптимального решения, не является строгим. Более строгим было бы байесовское решение [12] (минимизирующее средние потери):

$$P = \min \int \int_{(D)} \dots \int L(x_1, x_2, \dots, x_n) f(x_1, x_2, \dots, x_n) \times dx_1, \dots, dx_n, \quad (4)$$

где L — функция, связывающая потери (возможно в денежном выражении) с режимом работы энергосистемы (включая и режимы без к. з.) и действием УРЗ. Невозможность определения L приводит к необходимости использования критериев вида (3), принятие которых в качестве критериев оптимизации эквивалентно с позиций байесовских решений, принятию гипотезы о том, что пространство интегрирования D можно разбить на такие подпространства, внутри которых $L = \text{const}$. При принятии этого, достаточно грубого (в случае небольшого числа подпространств, число которых сильно ограничено с точки зрения сложности принятия окончательного решения) допущения, вряд ли рационально предъявлять повышенные требования к точности определения плотности $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Кроме этого, отметим и известный в теории статистических решений результат [12], из которого следует, что байесовские решения относительно слабо зависят от точности задания плотности распределения системы случайных величин. Получены подтверждения об относительной низких требованиях к точности задания законов распределения случайных величин и расчетным путем. Были проведены испытания реле для различных поддиапазонов существования величин φ , r_3 . Во всех случаях независимо от поддиапазона лучшим оказались одни и те же реле.

Точность метода статистических испытаний. Точность метода зависит от числа испытаний. При заданной точности число испытаний M определяется выражением [12]:

$$M = \frac{P(1-P)}{\varepsilon^2} \left[\Phi^{-1} \left(\frac{1}{2} Q \right) \right]^2, \quad (5)$$

где Q — достоверность расчетов; ε — абсолютная погрешность результата расчетов; P — вероятность моделируемого события (именно эта вероятность и определяется, однако для оценки числа испытаний можно задать значением этой вероятности исходя из имеющегося опыта. В ходе расчетов значения P и

соответственно M уточняются). Из (5) видно, что число испытаний растет обратно пропорционально точности. Так, для $Q = 0,95$, $\varepsilon = 0,01$ и $P = 0,9$ получаем $M = 3500$. Время, необходимое для проведения такого числа испытаний на ЭВМ ЕС-1022, колеблется в пределах минут. При решении задач оптимизации и сопоставления вариантов выполнения УРЗ, когда требуется многократное определение значений критериев эффективности, время решения задачи становится большим, что обуславливает необходимость применения приемов уточнения метода статистических испытаний.

При решении задач оптимизации и сопоставления УРЗ весьма эффективным является метод зависимых испытаний [13]. Эффективность этого метода определяется не только общими причинами, известными в теории методов статистических испытаний, но дополнительно и за счет того, что при организации зависимых испытаний моделируется одновременное испытание многих вариантов построения УРЗ; при этом появляются общие блоки — блок, генерирующий значения случайных величин, и блок, вычисляющий значения токов и напряжений в месте установки УРЗ. Однократная работа этих блоков требуется для определения значений критериев эффективности многих вариантов выполнения УРЗ. Существует возможность применения и метода введения статистических весов [13] для повышения точности расчетов.

На основе описанной методики и исходных данных, представленных ниже, проведены статистические испытания ряда МРС [2—5].

Параметр	$\frac{z_{1с}, z_{2с}}{z_{0с}}$ Ом	$z_{0с}$ Ом	$\arg z_{0с}$ рад	$\arg z_{0с}$ рад	φ рад	r_3 Ом	$l_{к}/l_{лин}$
Нижний предел	0,4	0,2	1,22	1,4	-1,04	0	0
Диапазон изменения	20,0	50	0,35	0,17	2,08	15	1

Лучшие результаты получены для реле по структурной схеме, приведенной на рис. 1. Основные результаты расчетов иллюстрируются на рис. 6 для линий длиной: 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 и 50—60 км. Результаты для указанных диапазонов обозначены соответствующими цифрами. Расчет вероятности срабатывания $P_{ср}$ проводился для 8 поддиапазонов линии. Черным цветом показаны результаты испытания реле с треугольной формой характеристики [4], белым — реле по структурной схеме рис. 1 с оптимизированными параметрами, которые отражены в таблице. В таблице даны и среднеквадратические отклонения конца зоны σ_{Δ} — для реле с треугольной формой характеристик, $\sigma_{р}$ — для реле с регулируемой формой характеристик. С увеличением длины линии эффективность обоих реле сближается. Вероятность срабатывания при к. з., удаленность которых больше уставки ($0,8 l_{лин} < l_{к} < l_{лин}$), для обоих реле примерно одинакова и не превышает 0,015. Измерительные трансформаторы тока и напряжения считались идеальными. Поиск оптимальных значений параметров МРС (длительность формируемых импульсов по рис. 2) проводился методом перебора (сканирования). Уставка реле в соответствии с рекомендациями 2 считалась заданной.

Выводы. 1. Сопоставление и оптимизация многофазных реле сопротивления относится к классу задач многокритериальной оптимизации высокой мерности.

2. Применение метода статистических испытаний позволяет уменьшить число критериев эффективности, избежать необхо-

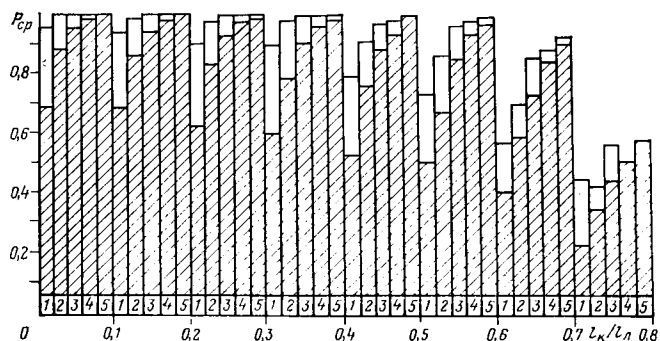


Рис. 6. Основные результаты испытаний МРС при коротких замыканиях в зоне

№	Длина линии, км	Оптимальные параметры формы характеристики, град			Среднеквадратическое отклонение конца, зоны	
		α	β	φ	σ_p	σ_{Δ}
1	10—20	50	5	40	0,23	0,33
2	20—30	50	5	50	0,14	0,27
3	30—40	50	5	55	0,12	0,22
4	40—50	50	5	60	0,08	0,13
5	50—60	50	5	60	0,07	0,11

дмости принятия грубых допущений, определить небольшое число критериев, в достаточно полной мере характеризующих техническое совершенство реле, а в случае сопоставления вариантов выполнения устройств — получить значения глобального критерия эффективности — среднеквадратического отклонения конца зоны.

3. Наибольшим препятствием к применению метода статистических испытаний к анализу работы МРС является трудность получения данных о статистических свойствах факторов, влияющих на их функционирование. В первом приближении законы распределения указанных факторов могут быть приняты равномерными.

4. Моделирование функционирования МРС показало, что наилучшими показателями из значительного числа известных вариантов обладает многофазное реле сопротивления с регулируемой формой характеристики (рис. 1). Оптимальная форма характеристики зависит от длины линии. При увеличении длины линии оптимальная форма характеристики приближается к треугольной. Зависимость параметров, характеризующих оптимальную форму характеристики от длины линии отражена в таблице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. — М.: Энергия, 1976.

2. Фабрикант В. Л. Дистанционная защита. — М.: Высшая школа, 1978.

3. Мутон Л., Суяр М. Быстродействующее реле сопротивления. — В кн.: Современная релейная защита. — М.: Энергия, 1970.

4. Аржаников Е. А. Многофазные реле сопротивления регулируемой чувствительностью к переходным сопротивлениям. — Электричество, 1977, № 8.

5. Рубинчик В. А. Сравнительная оценка чувствительности к переходным сопротивлениям измерительных органов защиты от замыканий на землю линий электропередач. — Электричество, 1973, № 12.

6. Эль-Хадиди М. А. Некоторые вопросы анализа работы реле сопротивления. — Электричество, 1979, № 12.

7. Монахан Н. Анализ поведения реле при однофазном коротком замыкании через высокое переходное сопротивление в системах 110 кВ с глухозаземленными нейтральными. — В кн.: Релейная защита и противоаварийная автоматика/Под ред. В. М. Ермоленко и А. М. Федосеева. — М.: Энергия, 1978.

8. Гаэке В. Г., Саухатас А. С. Применение метода Монте-Карло для анализа работы устройств релейной защиты. — Изв. вузов. Энергетика, 1975, № 7.

9. Вентцель Е. С. Исследование операций. — М.: Советское радио, 1972.

10. Якоб Д. Вероятностный подход к оценке технического совершенствования к расчету характеристики устройств релейной защиты. — Электричество, 1974, № 7.

11. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. — М.: Мир, 1969.

12. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. — М.: Мир, 1974.

13. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)/Н. П. Бусленко, Д. И. Голенко, И. М. Соболев, Срагович В. Г., Шнейдер Ю. А. и др. М.: Физматгиз, 1962.

[20.11.80]