

УДК 621.316.925

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

**Ахмедова О.О., Бахтиаров К.Н.**

*Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета (опорный университет), Камышин, e-mail: Ahmedova-olga@mail.ru*

Анализ причин большинства крупных аварий, происходящих в энергосистемах во всем мире, показывает, что причиной является неверное функционирование устройств релейной защиты, особенно опасным является каскадное отключение в процессе прогрессирующей аварии. Таким образом, надежность энергосистемы напрямую зависит от правильной и надежной работы устройств релейной защиты. Современный подход к развитию микропроцессорных устройств релейной защиты и противоаварийной автоматике позволил создать единый информационный комплекс, который не только реагирует на аварийные и ненормальные режимы работы энергосистемы, но и способен производить измерения параметров сети, регулировку и управление оборудованием, это еще один шаг к внедрению «цифровой подстанции». Цифровые терминалы обладают целым рядом преимуществ, по сравнению с ранее применяемыми электромеханическими реле, поэтому они так активно занимают освободившуюся нишу. Но, несмотря на все их достоинства, не произошло изменение алгоритмов функционирования защит на цифровой базе в сравнении с электромеханическим исполнением, хотя для увеличения надежности, при существующих возможностях микропроцессорных терминалов релейной защиты, возможно применение иных алгоритмов селекции токов короткого замыкания с последующим формированием управляющего воздействия.

**Ключевые слова:** релейная защита, алгоритм, воздушная линия электропередачи, коэффициент чувствительности

## DEVELOPMENT OF THE ALGORITHM OF FUNCTIONING OF THE MANAGING DIRECTOR OF SYSTEM OF HIGH-SPEED RELAY PROTECTION OF THE AIR-LINE OF THE ELECTRICITY TRANSMISSION

**Akhmedova O.O., Bakhtiarov K.N.**

*Kamyshin Institute of Technology (branch) of the Volgograd State Technical University (basic university), Kamyshin, e-mail: Ahmedova-olga@mail.ru*

The analysis of the reasons of the majority of the major accidents happening in power supply systems around the world shows that incorrect functioning of devices of relay protection is the reason, the cascade switch-off in the course of the progressing accident is especially dangerous. Thus, reliability of a power supply system directly depends on the correct and reliable operation of devices of relay protection. The modern approach to development of microprocessor devices of relay protection and antiabnormal automatic equipment allowed to create a uniform information complex which not only reacts to emergency and not standard duties of operation of a power supply system, but also is capable to perform measurements of parameters of a network, regulation and control of the equipment, it is one more step to implementation of «digital substation». Digital terminals have a number of advantages, in comparison with earlier used electromechanical relays therefore they so actively occupy the freed niche. But, without looking, on all their advantages there was no change of algorithms of functioning of protection on a digital basis in comparison with electromechanical execution though for increase in reliability, in case of the existing opportunities of microprocessor terminals of relay protection, application of other algorithms of selection of short-circuit currents with the subsequent formation of the controlling influence is possible.

**Keywords:** relay protection, algorithm, electricity transmission air-line, sensitivity coefficient

Ввиду целого ряда преимуществ микропроцессорных терминалов перед электромеханическими реле, большое количество зарубежных и отечественных фирм-изготовителей переходят на цифровую базу. Хотя переход осуществляется без внедрения каких-либо новых алгоритмов функционирования, все цифровые устройства релейной защиты функционируют аналогично электромеханическим прототипам, но обладают гораздо большими функциональными возможностями, что упрощает их эксплуатацию. Именно по этим причинам микропроцессорные устройства

очень быстро занимают место устаревших электромеханических и микроэлектронных устройств [1].

Многие производители микропроцессорных устройств релейной защиты (АО «Шнайдер Электрик», ОАО «Нипом», ЗАО «Радиус Автоматика» и др.) используют практически такие же алгоритмы функционирования, как и в электромеханических реле. Приоритетным направлением развития устройств РЗ, в рамках перехода к «Цифровым подстанциям», является создание системы автоматизированного выбора уставок и функций релейной защиты и автоматики.

Различные производители данных устройств лишь предлагают два варианта уставок, которые необходимо изменять вручную с непосредственным выездом оперативного персонала в место установки защит, т.е. в данных устройствах нет возможности адаптировать ток срабатывания защиты под изменяющиеся параметры окружающей среды, которые оказывают значительное влияние на параметры воздушной линии электропередачи. В результате уставка, выставленная на устройствах микропроцессорных реле, не всегда является корректной и может привести к отказу действия релейной защиты либо к ложному срабатыванию. Следовательно, необходимо разработать систему релейной защиты с адаптивной уставкой срабатывания, зависящей от изменения внешних условий окружающей среды и нагрузочного тока, в распределительных воздушных линиях электропередачи.

Произведем анализ изменения тока срабатывания защиты, учитывая изменение активного и реактивного сопротивления ВЛ, связанного с изменением температуры, влажности воздуха, скорости ветра и влажности грунта под воздушной линией электропередачи.

Анализ показывает, что влияние изменения температуры провода даёт изменение тока срабатывания токовой отсечки в пределах 2,5%. При расчете тока трехфазного короткого замыкания по традиционной методике погрешность составляет около 6%. Вероятность возникновения коротких замыканий в электрических сетях

110 кВ по различным видам повреждений распределяется следующим образом, на долю трехфазных КЗ приходится 4% повреждений, двухфазных на землю – 8%, двухфазных – 5%, однофазных – 83%. Определение тока уставки релейной защиты по максимальному току трехфазного короткого замыкания может приводить к некорректным действиям устройств релейной защиты. Следовательно, при проведении расчета с использованием тока трехфазного короткого замыкания процент погрешности в определении уставки по току будет выглядеть следующим образом: при двухфазном коротком замыкании составит – 22%, при однофазном – 9%, при двухфазном на землю – 7%, расчёты производились при сопротивлении грунта 20 Ом·м для ВЛЭП представленной на рис. 1 (рис. 2, 3).

Изменения сопротивления грунта влияют лишь на те виды повреждений, при которых появляется ток нулевой последовательности, поэтому к рассмотрению приняты однофазное короткое и двухфазное короткое замыкание на землю. Учёт двух факторов влияния (колебаний температуры провода и сопротивления грунта) приводит к погрешности расчёта при определении тока срабатывания при однофазном КЗ до 17%, а при двухфазном на землю – 7%.

На основании анализа факторов, влияющих на продольные и поперечные параметры воздушных линий электропередачи, предлагается алгоритм функционирования токовой отсечки с использованием адаптивной уставкой.

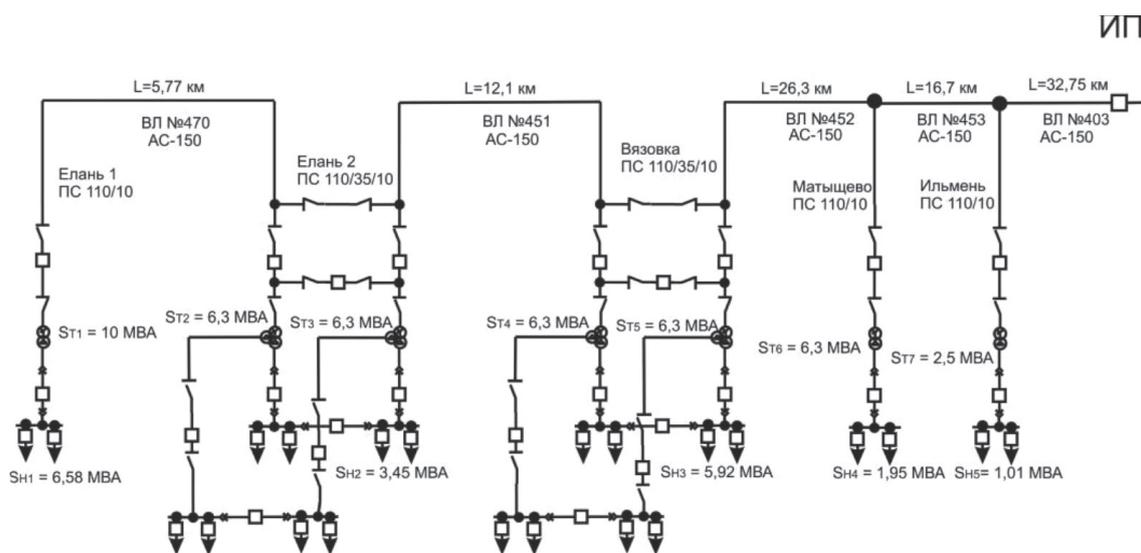


Рис. 1. Радиальная линия электропередачи

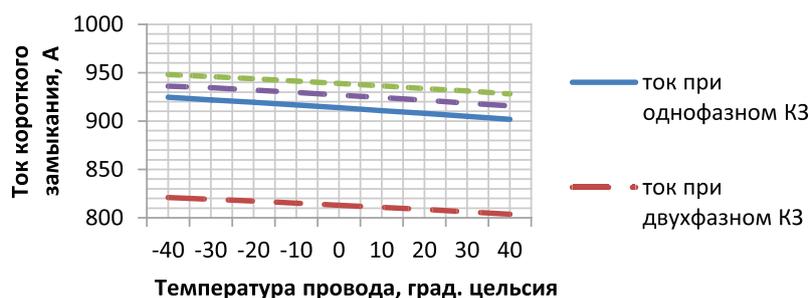


Рис. 2. Зависимость изменения тока короткого замыкания при различных видах повреждений от температуры провода ВЛ

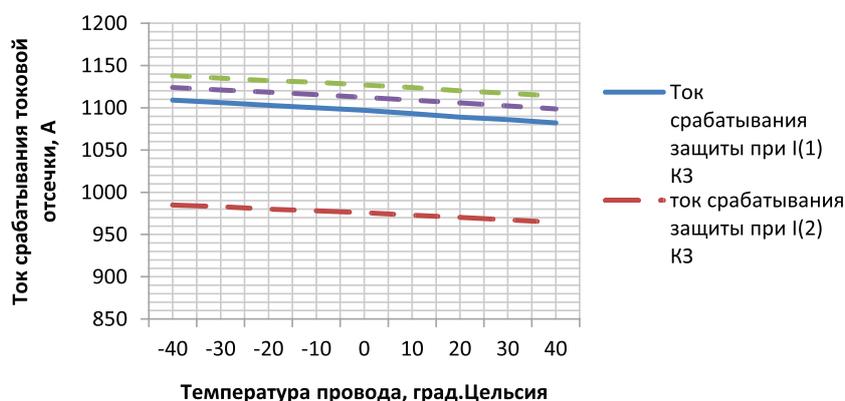


Рис. 3. Зависимость изменения тока срабатывания токовой отсечки при различных видах коротких замыканий от температуры провода ВЛ

Порядок расчета по предлагаемому алгоритму определения уставок основных быстродействующих защит (на примере токовой отсечки).

1. Определить параметры силовых трансформаторов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

2. На защищаемой ВЛ устанавливаются датчики, фиксирующие данные о температуре окружающей среды, влажности воздуха, скорости ветра и влажности грунта под воздушной линией электропередачи, параметры замеров по каналам связи передаются в систему релейной защиты для дальнейшего анализа.

3. На основании полученных данных и рассчитываются действительные продольные и поперечные параметры воздушной линии электропередачи прямой, обратной и нулевой последовательностей.

4. На основании данных о ВЛ сети производится преобразование схем замещения и определение эквивалентных активных, реактивных сопротивлений и эквивалентных ЭДС.

5. Методом симметричных составляющих производится расчёт токов короткого

замыкания согласно традиционной методике [2, 3].

6. Производится расчет уставок быстродействующей релейной защиты на основании токов короткого замыкания, возникающих при различных видах повреждений.

7. Непрерывное снятие данных с трансформаторов тока, установленных на ВЛ ( $ТТ_A$ ,  $ТТ_B$ ,  $ТТ_C$ ), а также с трансформаторов тока, соединенных в фильтр нулевой последовательности ( $ТТ_{A0}$ ,  $ТТ_{B0}$ ,  $ТТ_{C0}$ ). Показания силы тока от  $ТТ_{A0}$ ,  $ТТ_{B0}$ ,  $ТТ_{C0}$  сравниваются между собой:

а) в нормальном рабочем режиме никакого управляющего воздействия не формируется;

б) при повреждении на контролируемой ВЛ и, как следствие, увеличении тока во вторичной обмотке трансформатора тока поврежденной фазы производится сравнение значений вторичных токов ТТ для выбора максимального из них, которое запоминается системой РЗ и с данным значением производится сравнение тока уставки (рассчитанного в п. 6) при соответствующем виде повреждения.

8. Для селекции повреждений и обращения в расчетах к необходимой переменной тока уставки используются логиче-

ские уравнения, основанные на методике расчета несимметричных коротких замыканий [2, 3].

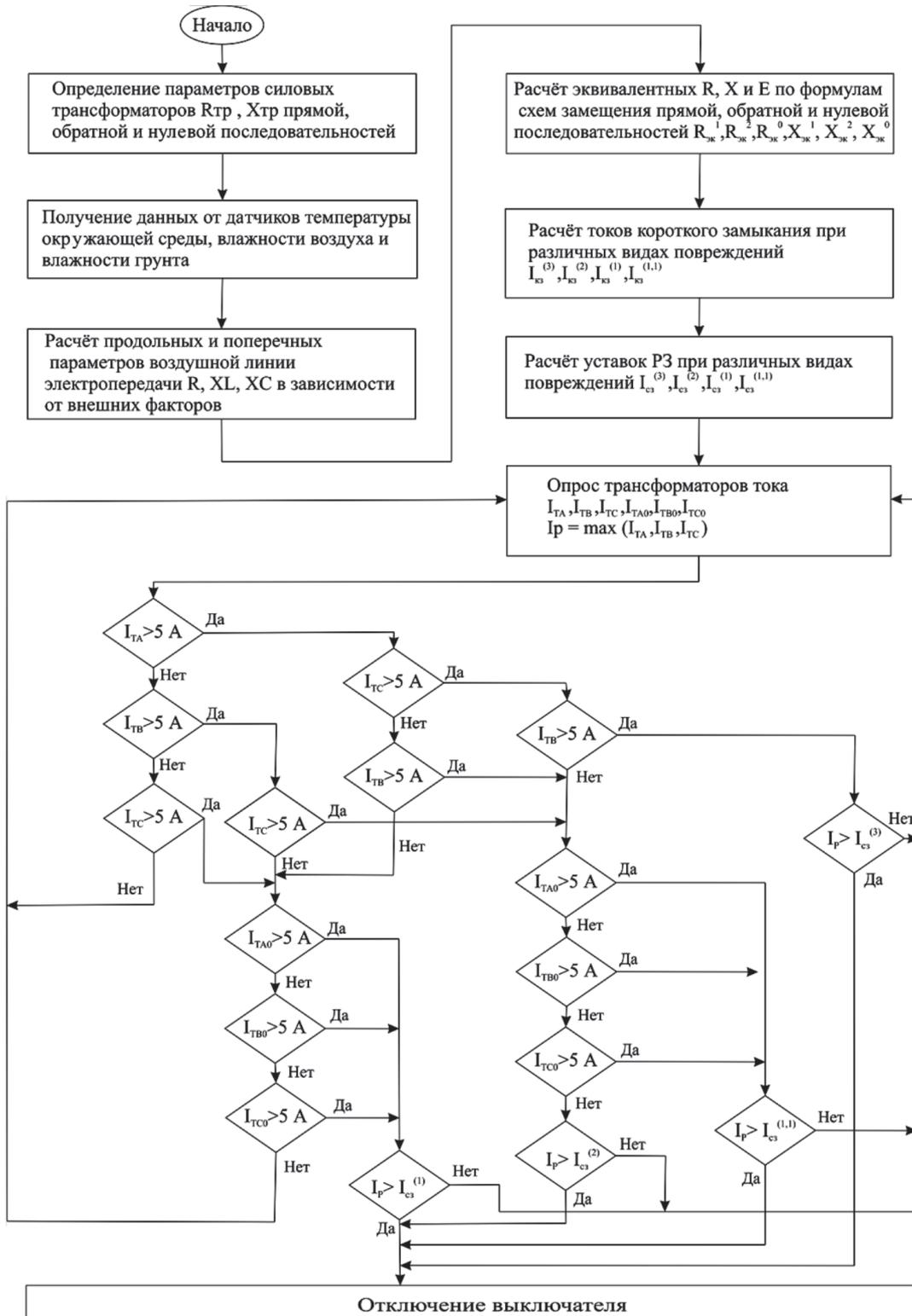


Рис. 4. Предлагаемый алгоритм функционирования системы релейной защиты с адаптивной уставкой

На первом этапе создается математическая модель контролируемой сети электроснабжения в среде Mathcad, где производится ее тестирование, далее формулы для определения параметров источника питания, силовых трансформаторов и воздушных линий передачи переводятся на язык программирования, также прописываются формулы схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей с учетом трансформаторных связей. В формулы для определения продольных и поперечных параметров линии вводятся переменные, значение которым присваивается равное параметрам полученных от датчиков установленных на ВЛ, с частотой обновления в 10 мин. Так же в качестве переменных выступают значения токов, полученных от трех трансформаторов тока установленных на фазах  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  и трех трансформаторов тока, подключенных в фильтр нулевой последовательности  $T_{A0}$ ,  $T_{B0}$ ,  $T_{C0}$ , так как их вторичные токи являются известной величиной, то они могут служить источником информации о произошедшем повреждении, данные обновляются непрерывно. Кроме тока для быстрого сравнения тока уставки с током повреждения контролируемого трансформаторами тока непрерывно производится

сравнение вторичных токов ТТ  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  с целью выявления максимального значения  $I_p$  и запоминания его программой для дальнейшего вызова при фиксации короткого замыкания.

На втором этапе производится расчет токов короткого замыкания для однофазного, двухфазного, трехфазного и двухфазного короткого замыкания на землю, которые также пересчитываются каждые 10 мин, изменяясь от параметров окружающей среды, информация о которой отслеживается датчиками температуры, влажности воздуха, скорости ветра и влажности грунта. На основании рассчитанных токов короткого замыкания определяются токи срабатывания защиты при различных видах повреждений.

Далее производится селекция вида повреждения в зависимости, от каких из трансформаторов тока пришел сигнал об увеличении вторичного тока согласно логическим уравнениям, присвоенным каждому виду короткого замыкания и вызывается для сравнения с током повреждения  $I_p$  соответствующая уставка тока срабатывания защиты.

Если поведение защиты представить в виде логической функции  $T$ , то условие срабатывания при однофазном коротком замыкании можно записать в виде

$$T = \left[ \begin{aligned} & \left( (I_{TA} \text{ AND } (I_{TA0} \text{ OR } I_{TB0} \text{ OR } I_{TC0}) > 5A) \text{ OR } (I_{TB} \text{ AND } (I_{TA0} \text{ OR } I_{TB0} \text{ OR } I_{TC0}) > 5A) \text{ OR } \right. \\ & \left. (I_{TC} \text{ AND } (I_{TA0} \text{ OR } I_{TB0} \text{ OR } I_{TC0}) > 5A) = 1 \right) \end{aligned} \right]$$

двухфазном коротком замыкании –

$$T = \left[ (I_{TA} \text{ AND } I_{TB} > 5A) \text{ OR } (I_{TB} \text{ AND } I_{TC} > 5A) \text{ OR } (I_{TA} \text{ AND } I_{TC} > 5A) = 1 \right]$$

двухфазном коротком замыкании на землю –

$$T = \left[ \begin{aligned} & \left( (I_{TA} \text{ AND } I_{TB}) \text{ AND } (I_{TA0} \text{ OR } I_{TB0} \text{ OR } I_{TC0}) > 5A \right) \text{ OR } \left( (I_{TB} \text{ AND } I_{TC}) \text{ AND } \right. \\ & \left. (I_{TA0} \text{ OR } I_{TB0} \text{ OR } I_{TC0}) > 5A \right) \text{ OR } \\ & \left( (I_{TA} \text{ AND } I_{TC}) \text{ AND } (I_{TA0} \text{ OR } I_{TB0} \text{ OR } I_{TC0}) > 5A \right) = 1 \end{aligned} \right]$$

трехфазном коротком замыкании –

$$T = \left[ (I_{TA} \text{ AND } I_{TB} \text{ AND } I_{TC} > 5A) = 1 \right].$$

При получении на выходе логической функции  $T = 1$  производится проверка условия  $I_p > I_{сз}$ , при выполнении неравенства подается выходной сигнал на отключение выключателя, если же неравенство является неверным, то запускается программой цикл и сигнал опять поступает на блок опроса трансформаторов тока [4, 5].

Чувствительность первой ступени определяется графически. Рассмотрим изменения длины «мертвой зоны» при различных видах токов короткого замыкания и сопротивлении грунта под ВЛЭП, представленной на рис. 1 (рис. 5, 6).

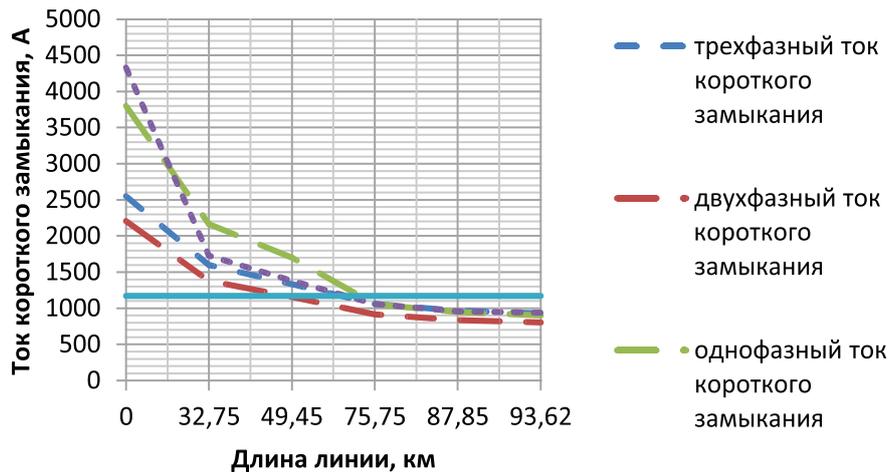


Рис. 5. Изменение величины «мертвой зоны» при сопротивлении грунта 20 Ом·м, уставка рассчитана по традиционной методике ВЛ

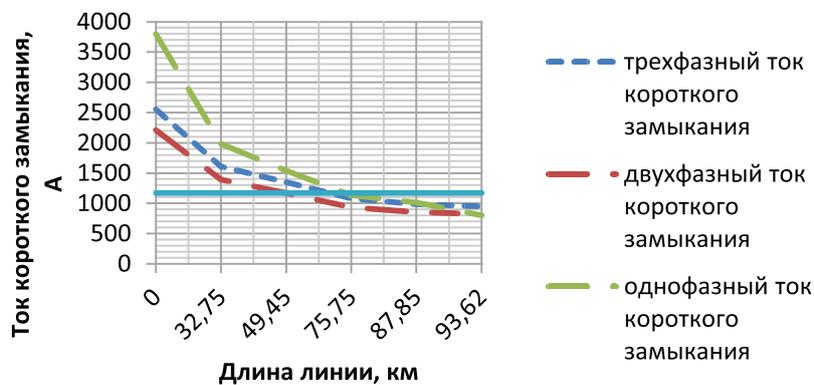


Рис. 6. Изменение величины «мертвой зоны» при сопротивлении грунта 1000 Ом·м, уставка рассчитана по традиционной методике ВЛ

Величина «мертвой зоны» ТО при различных сопротивлениях грунта

№ п/п	Вид повреждения	Длина «мертвой зоны», %	
		$\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $t_{\text{пр}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ $t_{\text{пр}} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$
1	Трехфазное короткое замыкание	33,1	26,11
2	Двухфазное короткое замыкание	47,18	40,15
3	Однофазное короткое замыкание	26,11	19,08
4	Двухфазное короткое замыкание на землю	33,1	30,4

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5 и 6, показывает, что в зависимости от сопротивления земли под воздушной линией электропередачи зона «не срабатывания» релейной защиты изменяется. «Мертвая зона» при трехфазном коротком замыкании при сопротивлении грунта 20 Ом·м составит 33,1%, а при сопротивле-

нии 1000 Ом·м – 12,6%, остальные данные сводятся в таблицу.

Игнорирование при расчёте уставок релейной защиты сезонное изменение сопротивления грунта или же его изменение на протяжении линии электропередачи может привести к существенным погрешностям, особенно если принять во внима-

ние, что расчеты по традиционной методике ведутся для  $I_{сз}^{(3)}$ .

Алгоритм функционирования основной защиты позволяет устранить возможность ошибок, связанных с человеческим фактором, так как система производит автоматический расчет уставки тока срабатывания, опрашивая, подключены ли датчики к линии электропередачи, и анализируя величину вторичного тока трансформаторов тока. Как упоминалось выше, для защиты от междуфазных замыканий в качестве быстродействующей применяются токовую отсечку, короткие замыкания на землю контролируются «земляной защитой», реагирующей на появление тока нулевой последовательности.

### Выводы

1. Разработан многопараметрический алгоритм функционирования релейной защиты с адаптивной уставкой, основанный на вычислении токов короткого замыкания на основе данных получаемых непосред-

ственно от датчиков, установленных на ВЛ, и от трансформаторов тока.

2. Установлено влияние изменения сопротивления грунта на длину «мертвой зоны», следовательно, придерживаясь традиционной методики расчета, не представляется возможным достоверно оценить коэффициент чувствительности защиты без учета внешних факторов.

### Список литературы

1. Гуревич В.И. Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. – М.: Инфра-Инженерия, 2011. – 336 с.
2. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие. – Новосибирск: НГТУ, М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2010. – 283 с.
3. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008 – 416 с.
4. Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 334 с.
5. Небрат И.Л. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты: учеб. пособие. Часть первая. – СПб.: ПЭИПК, 2008. – 51 с.