

УДК 621.316.925

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УЧАСТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ОТВЕТВИТЕЛЬНЫМИ И ПРОХОДНЫМИ ПОДСТАНЦИЯМИ

Ахмедова О.О., Панасенко М.В.

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

Для защиты линий электропередач устанавливают два вида защит: основную, являющуюся быстродействующей, и резервную, выполняющую необходимую задержку по времени, как правило, для этих целей используется максимальная токовая защита, дистанционная защита и токовая защита нулевой последовательности. При этом максимальные токовые защиты и дистанционные защиты устанавливаются для защиты от трехфазных и двухфазных коротких замыканий, а токовая защита нулевой последовательности служит для защиты от повреждений на землю. Устройства релейной защиты и автоматики могут функционировать некорректно (срабатывать излишне или ложно, или неправильно рассчитывать расстояние до места замыкания), если их параметры срабатывания не отражают действительного положения контролируемой воздушной линии электропередачи (ВЛЭП). Актуальным является уточнение параметров ВЛЭП для верного определения уставок релейной защиты (РЗ). Вышеперечисленные факторы, обуславливают необходимость разработки алгоритма функционирования релейной защиты ВЛ, учитывающей изменения внешних параметров окружающей среды и адаптирующей автоматически уставку, также предлагается для увеличения надежности срабатывания и чувствительности РЗ использовать при расчете уставок токи короткого замыкания, определяемые по методу несимметричных составляющих.

**Ключевые слова:** релейная защита и автоматика, параметры срабатывания, продольные и поперечные параметры, воздушная линия электропередачи

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHOD OF CALCULATION OF EMERGENCY OPERATION OF WORK OF THE SITE OF THE ELECTRICAL NETWORK WITH OTVETVITELNY AND SUBSTATIONS THROUGH PASSAGE

Akhmedova O.O., Panasenکو M.V.

*Kamyshin institute of technology (branch) of the Volgograd state technical university (basic university), Kamyshin, e-mail: Ahmedova-olga@mail.ru*

Traditionally as the reserve protection established on power lines the maximum and current protection (MCP), the remote protection (RP) and the current protection of the zero sequence (CPZS) are applied. At the same time the maximum current protection and remote protection are intended for identification of interphase short circuits, and current protection of the zero sequence – single-phase and two-phase KZ on the earth. Devices of relay protection and automatic equipment can incorrectly function (to work in a false manner or excessively, or not truly to define distance to the place of damage) if their parameters of operation don't reflect a real condition of a controlled air-line of an electricity transmission (VLEP). Specification of the VLEP parameters for the right definition of settings of the relay protection (RP) is relevant. The listed factors are higher, cause need of the development of an algorithm of functioning of relay protection of VL considering changes of external parameters of the environment and adapting automatically a setting also it is offered to use for increase in reliability of operation and sensitivity of RZ when calculating settings the currents of short circuit determined by a method of asymmetrical components.

**Keywords:** relay protection and automatic equipment, operation parameters, longitudinal and cross parameters, electricity transmission air-line

Основными особенностями ответвительных и проходных подстанций является применение высоковольтных коммутационных аппаратов «отделитель – короткозамыкатель» на высокой стороне, питание переменным (выпрямленным) оперативным током и отсутствие дежурного персонала.

Устройства релейной защиты подключаются через трансформаторы тока, в данном случае (рис. 1) установленные на стороне высокого напряжения силового трансформатора  $T1$  и  $T2$ , контролирующие повреждения в защищаемой зоне.

В случае повреждения защита воздействует на короткозамыкатель, который в свою очередь создаст однофазное корот-

кое замыкание, отключить которое должны основные защиты, установленные на воздушной линии электропередачи. Затем при отключенном выключателе на головном участке образуется бестоковая пауза, в которую и должен сработать отделитель, произведя отключение поврежденного силового трансформатора. Работа головной линии восстанавливается при помощи включения автоматики.

При повреждениях на линии электропередачи напряжением 110 кВ действуют защиты непосредственно на ней установленные (AK1, AK2, AK3, AK4) с дальнейшим управляющим воздействием на соответствующий выключатель.

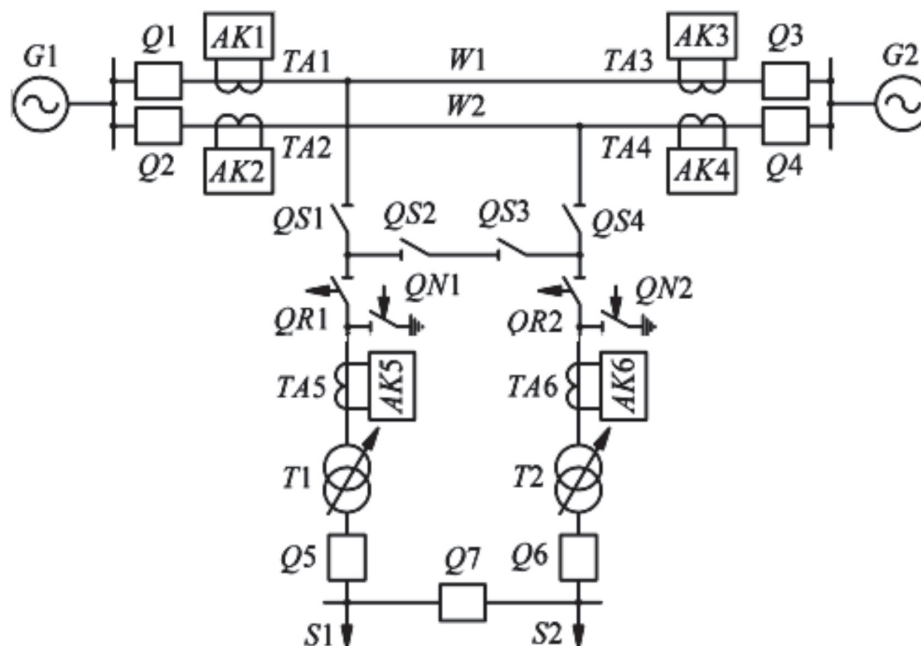


Рис. 1. Участок электрической сети с ответвленными подстанциями без коммутационных аппаратов на высокой стороне

Питание устройств релейной защиты и автоматики от источника переменного оперативного тока (как правило, от трансформатора собственных нужд) имеет целый ряд преимуществ перед источником постоянного тока (аккумуляторные батареи), которые необходимо периодически обслуживать, иметь специальные помещения и специализированный персонал [1, 2]. Источником оперативного переменного тока являются блоки питания, подключенные через трансформаторы тока, трансформаторы напряжения или трансформаторы собственных нужд трансформаторной подстанции.

В современных микропроцессорных терминалах релейной защиты и автоматики существуют два варианта установки уставок и переключение между ними, таким образом, данные устройства лишены возможности адаптировать параметры срабатывания под изменяющиеся внешние факторы, от которых напрямую зависит чувствительность защиты.

Вышеперечисленные факторы обуславливают необходимость разработки алгоритма функционирования релейной защиты ВЛ, учитывающей изменения внешних параметров окружающей среды и адаптирующей автоматически уставку, также предлагается для увеличения надежности срабатывания и чувствительности РЗ использовать при расчете уставок токи короткого замыкания, определяемые по методу несимметричных составляющих.

Согласно методическим указаниям по определению параметров срабатывания цифровых микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики для воздушных линий электропередачи с одним источником питания напряжением 110–330 кВ, разработанные ОАО «ФСК ЕЭС», при выборе уставок первой ступени максимальной токовой защиты (используется ТО, без задержки по времени) следует руководствоваться следующими условиями:

1. Отстраивать ток срабатывания защиты от максимального рабочего тока линии электропередачи:

$$I_{сз} = \frac{k_3 \cdot k_{сзп}}{k_B} \cdot I_{\text{раб.макс}}, \quad (1)$$

где  $k_3 = 1,1 \div 1,2$  – коэффициент запаса,  $k_B = 0,95$  – коэффициент возврата защиты,  $I_{\text{раб.макс}}$  – максимальный ток нагрузки линии,  $k_{сзп} \approx 1,5 \div 2,0$  – приблизительное значение коэффициента самозапуска, выбирается исходя из мощности и количества электродвигателей.

2. Отстраивать от максимального трехфазного тока короткого замыкания и максимального однофазного тока короткого замыкания на шинах смежной подстанции:

$$I_{сз} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{к.макс.ВН}}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{отс}} = 1,2 \div 1,3$  – коэффициент отстройки,  $I_{\text{к.макс.ВН}}$  – максимальный трехфазный ток ко-

роткого замыкания и максимальный однофазный ток короткого замыкания на шинах смежной подстанции.

3. Отстраивать от максимального рабочего тока при трехфазном коротком замыкании и замыкании на землю на низкой и средней сторонах трансформатора, подключенных на всех ответвлениях защищаемой линии электропередачи, или на низкой и средней сторонах трансформатора, подключенных к шинам подстанции на противоположном конце защищаемой линии и всех ее ответвлениях:

$$I_{сз} = k_{отс} \cdot I_{к.макс.тр}, \quad (3)$$

где  $k_{отс} = 1,2 \div 1,3$  – коэффициент отстройки,  $I_{к.макс.тр}$  – максимальный рабочий ток, проходящий по линии электропередачи при трехфазном и однофазном коротком замыкании на шинах подстанции на низкой и средней сторонах трансформатора, подключенных на всех ответвительных линиях или на шинах смежных подстанций.

4. Отстраивать от броска тока намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов, при включении их под напряжение через защищаемую линию:

$$I_{сз} = (4 \div 5) \cdot I_{\Sigma ном.тр}, \quad (4)$$

где  $I_{\Sigma ном.тр} = \frac{S_{\Sigma ном.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}$  – суммарное значение номинального тока подключенных трансформаторов или автотрансформаторов,  $S_{\Sigma ном.тр}$  – суммарное значение номинальной мощности подключенных трансформаторов или автотрансформаторов,  $U_{ном}$  – среднее номинальное напряжение сети.

К установке на защите принимается наибольшее значение тока срабатывания защиты рассчитанных исходя из условий выбора уставки срабатывания в пунктах 1–4.

По вышеизложенным условиям произведем расчёт тока срабатывания токовой отсечки для воздушной линии электропередачи. Она является радиальной линией с ответвительными и проходными подстанциями, выполнена проводом марки АС – 150 одноцепным исполнением, суммарная длина составляет 93,62 км. Полученные данные сведём в табл. 1.

Так как расчеты производятся в момент проектирования системы релейной защиты и далее в процессе эксплуатации при условии неизменности конфигурации сети, даже в современных устройствах микропроцессорной релейной защиты не изменяются на всем протяжении срока эксплуатации.

**Таблица 1**

Расчёт тока срабатывания токовой отсечки, основанный на традиционном порядке расчета уставок релейных защит

| № п/п | Условия отстройки                                 | Ток срабатывания защиты $I_{сз}$ , А |
|-------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1     | $I_{сз} = \frac{k_{отс}}{k_{в}} \cdot I_{н.макс}$ | 254 ÷ 307,9                          |
| 2     | $I_{сз} = k_{отс} \cdot I_{к.з макс. вн}$         | 1173,2 ÷ 1270,9                      |
| 3     | $I_{сз} = k_{отс} \cdot I_{к.з макс. тр}$         | 394,2 ÷ 427                          |
| 4     | $I_{сз} = (4 \div 5) \cdot I_{\Sigma ном.тр}$     | 923,7 ÷ 1154,7                       |

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.

Согласно традиционной методике [3, 4] воспользуемся формулами для нахождения фазных токов и симметричных составляющих токов в месте несимметричных коротких замыканий разных видов, для уменьшения погрешностей в расчетах учитывается не только реактивная составляющая сопротивления, но и активная.

Влияние изменения сопротивления грунта на ток срабатывания токовой отсечки иллюстрируется на рис. 2.

Из анализа влияния двух факторов окружающей среды, таких как изменение температуры провода и сопротивления грунта, можно сделать вывод, что погрешность в определении уставки по току в зависимости от вида повреждения будет колебаться от 7 до 17%. Так же выявлено, что увлажнение грунта, в связи с сезонными климатическими изменениями, будет влиять лишь на повреждения на землю, исключая все виды междуфазных коротких замыканий.

При анализе применения в качестве основной защиты – дифференциальной, кривые изменения тока короткого замыкания показаны на рис. 3, 4.

Из рис. 3 видно, что в отличие от других видов повреждений наименьшую зависимость от сезонных колебаний внешних условий имеет ток трехфазного к.з., в результате при расчете тока срабатывания защиты по  $I_{кз}^{(3)}$  погрешность не превышает требуемой 5%, но этот показатель не является объективным в случае возникновения другого вида короткого замыкания [5]. Величина отклонения расчетных параметров от фактически возникаемых на ВЛЭП зависит от конфигурации линии, выбранной защиты, значений сопротивлений активных

и реактивных прямой, обратной и нулевой последовательностей, территориального расположения и т.д., поэтому анализ разных участков электрических сетей дает весьма широкий диапазон изменения значений погрешностей расчетов. Так для ВЛ погрешность относительно трехфазного тока к.з.

составила при двухфазном к.з. – от 18 % до 20 %, при однофазном к.з. – от 63 % до 75 %, при двойном к.з. – от 24 % до 31 %.

На рис. 5 изображена динамика изменения тока срабатывания дифференциальной защиты при условии её отстройки от тока повреждения.

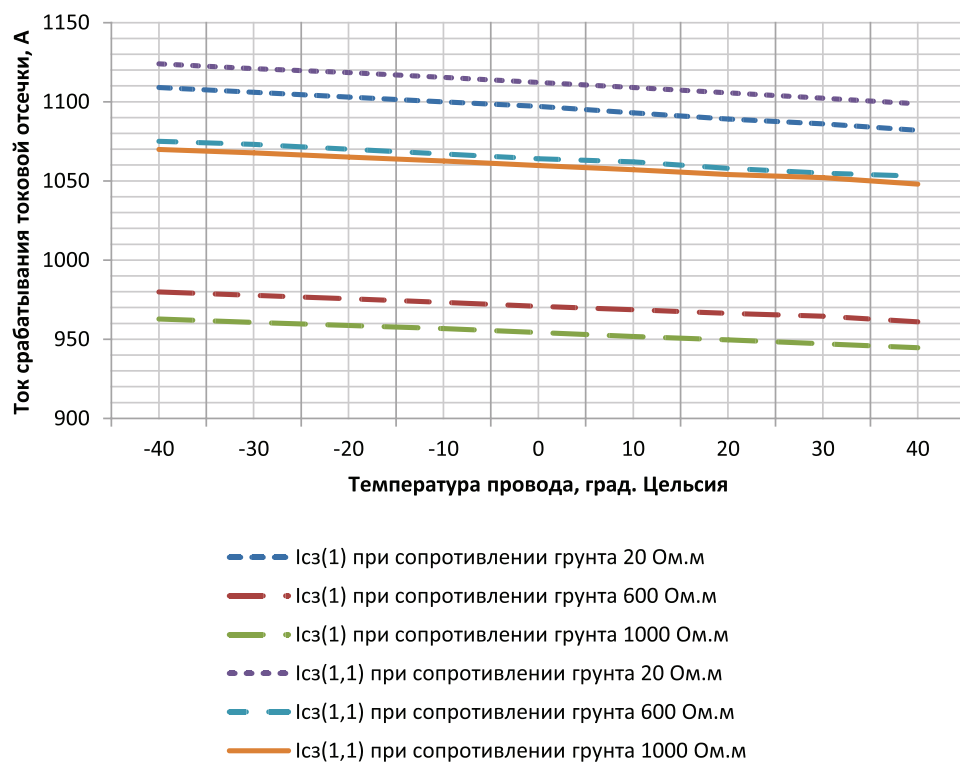


Рис. 2. Зависимость изменения тока срабатывания токовой отсечки при различных видах коротких замыканий от изменения величины сопротивления грунта под ВЛ

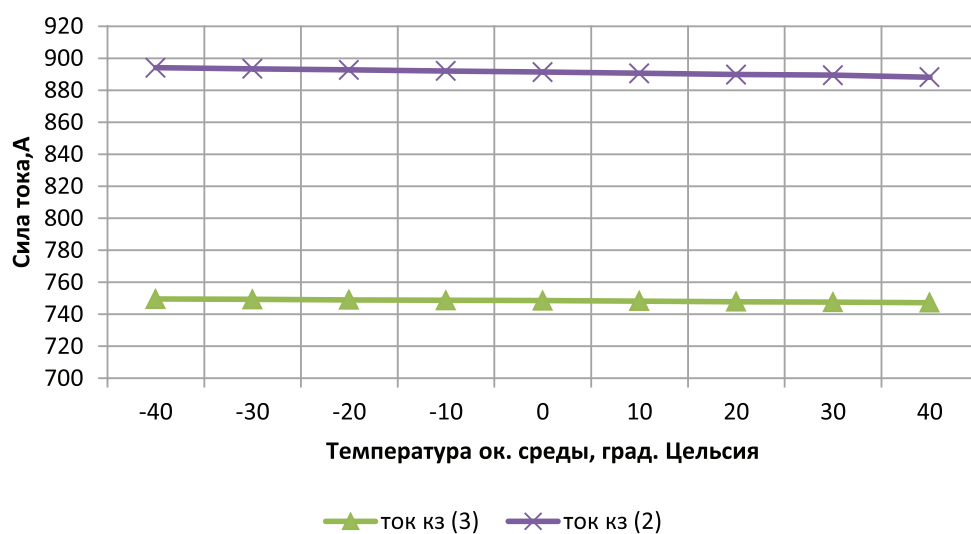


Рис. 3. Зависимости изменения трехфазного и двухфазного тока к.з. при колебаниях температуры окружающей среды ВЛ

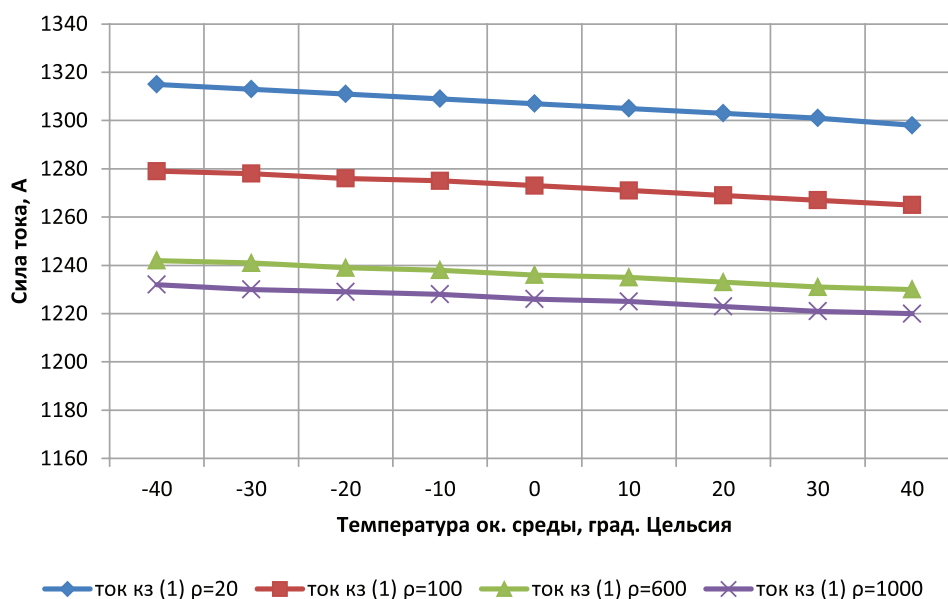


Рис. 4. Зависимости изменения однофазного тока к.з. при колебаниях параметров окружающей среды ВЛ

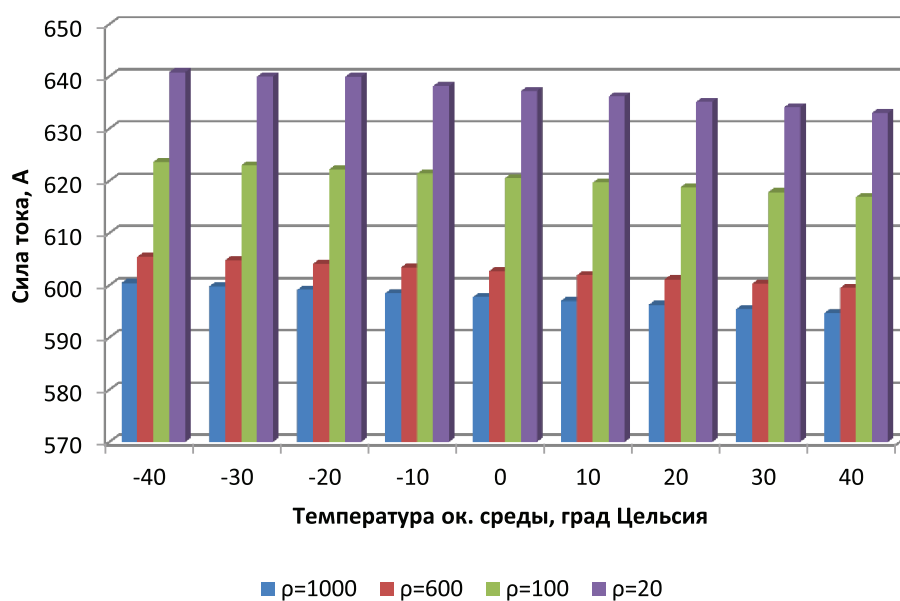


Рис. 5. Изменение тока срабатывания основной защиты при однофазном коротком замыкании ВЛ

Игнорирование при расчёте уставок релейной защиты, сезонное изменение сопротивления грунта или же его изменение на протяжении линии электропередачи могут привести к существенным погрешностям, особенно если принять во внимание, что расчеты по традиционной методике ведутся для  $I_{сз}^{(3)}$ .

Исходя из данных, представленных в табл. 2, видно, что при расчете тока сра-

батывания защиты, учитывая вид повреждения и изменение погодных условий, можно уменьшить длину «мертвой зоны» при ориентации на трехфазный ток короткого замыкания при наиболее распространенном виде повреждения (однофазном коротком замыкании) на 28 %, а при ориентации на двухфазный ток короткого замыкания на 20 %.

**Таблица 2**

Длина зоны «не срабатывания» ТО, рассчитанная по предлагаемой методике

| №<br>п/п | Уставка ТО выбираемая относительно<br>вида повреждения | Длина «мертвой зоны», %, относительно |                                       |                                     |                                       |
|----------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|          |                                                        | $I_{\text{кз}}^{(3)}$                 |                                       | $I_{\text{кз}}^{(2)}$               |                                       |
|          |                                                        | $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   | $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ | $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ | $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ |
|          |                                                        | $t_{\text{пр}} = 40^{\circ}\text{C}$  |                                       |                                     |                                       |
| 1        | Уставка при трехфазном КЗ                              | 26,11                                 | 26,11                                 | 40,15                               | 40,15                                 |
| 2        | Уставка при двухфазном КЗ                              | 23,77                                 | 23,77                                 | 37,8                                | 37,8                                  |
| 3        | Уставка при однофазном КЗ                              | 19,08                                 | 3,08                                  | 37,8                                | 19,09                                 |
| 4        | Уставка при двухфазном КЗ на землю                     | 26,11                                 | 15,8                                  | 40,15                               | 33,14                                 |

**Таблица 3**

Значение коэффициента чувствительности ТО

| №<br>п/п | Вид повреждения                        | Коэффициент чувствительности                                              |                                                                             |
|----------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|          |                                        | $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$<br>$t_{\text{пр}} = 40^\circ\text{C}$ | $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$<br>$t_{\text{пр}} = 40^\circ\text{C}$ |
| 1        | Трехфазное короткое замыкание          | 1,9                                                                       | 1,9                                                                         |
| 2        | Двухфазное короткое замыкание          | 2,2                                                                       | 2,2                                                                         |
| 3        | Однофазное короткое замыкание          | 1,96                                                                      | 2,25                                                                        |
| 4        | Двухфазное короткое замыкание на землю | 1,93                                                                      | 2,02                                                                        |

Значение коэффициента чувствительности, рассчитанного по традиционной методике, составит  $k_{\text{ч}} = 1,8$ , значение по этой величине с учетом предлагаемой методики выше на 45 % (табл. 3).

Микропроцессорные терминалы релейной защиты позволяют с высокой точностью выставлять токи срабатывания, вплоть до сотых долей ампер, завышение уставок защит на линиях напряжением 110 кВ и ниже приведет, как следствие, к заглублению токов срабатывания защит с абсолютной селективностью на более высоких напряжениях или же к необходимости установки дополнительной ступени, что влечет за собой необоснованные финансовые вложения.

### Список литературы

1. Гуревич В.И. Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. – М.: Инфра-Инженерия, 2011. – 336 с.
2. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2010. – 152 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. Ананичева С.С., Мызин А.Л. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учеб. пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 80 с.
5. Нагай В.И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.