

УДК 621.31

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОМП ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА НА ВЛ С ВЧ-ЗАГРАДИТЕЛЯМИ

В данной статье рассматривается влияние высокочастотных заградителей (ВЧЗ) на определение места повреждения воздушных линий (ОМП ВЛ) по параметрам аварийного режима. Предложены два способа учета заградителей, которые увеличивают точность ОМП. Эффективность предложенных технических решений подтверждается на имитационной модели и на реальных аварийных осциллограммах.

АВТОРЫ:

В.Н. Козлов, к. т. н.,  
К.И. Ермаков, к. т. н.,  
М.И. Кирюшин,  
А.В. Шашкий,  
А.Г. Иванов,  
ООО «НПП Бреслер»

С.В. Богатков,  
А.В. Строчков,  
филиал ПАО «Россети» – МЭС Волги

### Введение

Цифровые каналы связи играют важную роль в энергетике. Высокочастотная (ВЧ) связь по проводам ВЛ является одной из распространенных. Она используется для передачи сигналов противоаварийной автоматики, релейной защиты, телефонной связи, телемеханики.

Для предотвращения шунтирующего действия шин подстанции (ПС)

на линейный тракт используется ВЧ-заградитель, который включается в фазные провода ВЛ по концам канала связи. Индуктивность ВЧЗ создает большое сопротивление для токов высокой частоты, что препятствует распространению ВЧ-сигнала в сторону ПС и направляет его в линию [1].

Встречаются схемы ПС 330–750 кВ с ВЧЗ [2], в которых на ВЛ установле-

но два трансформатора напряжения (ТН) — ТН1 и ТН2 на рисунке 1.

Очевидно, что показания этих ТН будут отличаться на величину падения напряжения, которое зависит от тока, протекающего по линии, и сопротивления ВЧЗ. Например, заградитель марки ВЗ-2000–2,0 имеет индуктивность 2 мГн [3]. Соответственно, если пренебречь его активным сопротивлением, индуктивное сопротивление на частоте 50 Гц равно 0,628 Ом.

На некоторых линиях устанавливаются многокаскадные заградители, обладающие более высоким эквивалентным сопротивлением. На рисунке 2 приведен пример ПС с пятью последовательно подключенными заградителями. Данная схема используется для Т-образного фильтра, предназначенного для разделения по частотам и согласования каналов ВЧ-связи [4]. Суммарное индуктивное сопротивление заградителей на частоте 50 Гц составляет 3,14 Ом. Падение напряжения на таком сопротивлении соизмеримо с падением напряжения на участке линии длиной порядка 10 км. Соответственно, если ОМП выполняется с использованием напряжения с ТН1, данный факт необходимо учитывать. Если используется напряжение с ТН2, проблема не возникает.

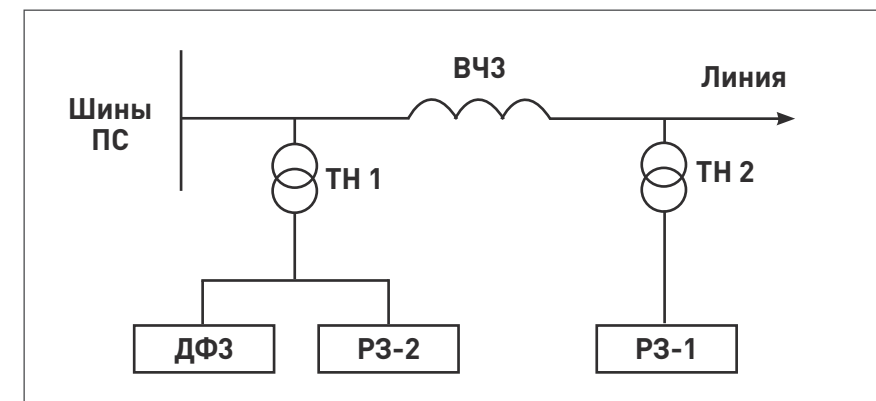
Оценим падение напряжения и влияние заградителей на ОМП с помощью имитационной модели.

### Оценка влияния ВЧЗ на ОМП по результатам моделирования ВЛ

Для исследования влияния ВЧЗ на ОМП в программном комплексе PSCAD создана модель [5] линии 500 кВ длиной 100 км с типовыми параметрами: марка провода 3\*АС-400/52, тип опор ПБ500–1 (рис. 3). Рассматриваются модели с одним ВЧЗ с индуктивностью 2 мГн и с каскадом из пяти ВЧЗ с общей индуктивностью 10 мГн.

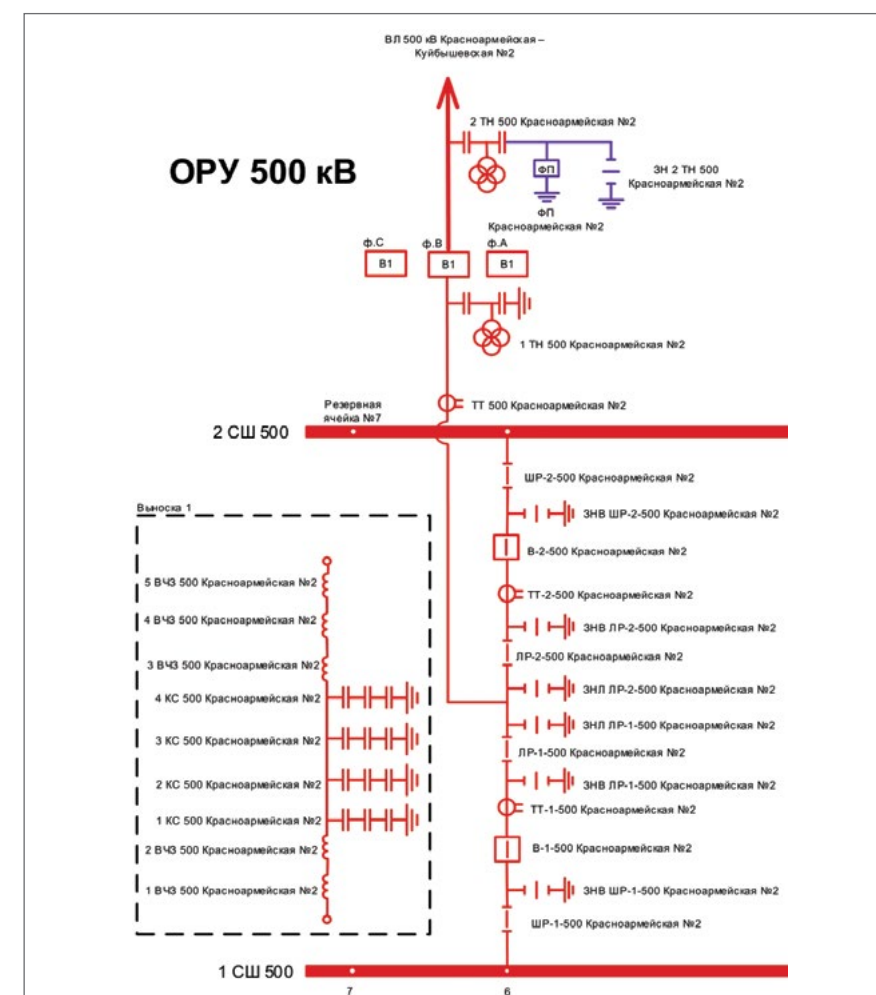
ПОДКЛЮЧЕНИЕ ТН ПРИ НАЛИЧИИ ВЧЗ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКТОВ ЗАЩИТ ПО ТН

Рис. 1



ФРАГМЕНТ СХЕМЫ ОРУ 500 кВ ПС «КУЙБЫШЕВСКАЯ» (ФИЛИАЛ ПАО «РОССЕТИ» – МЭС ВОЛГИ)

Рис. 2

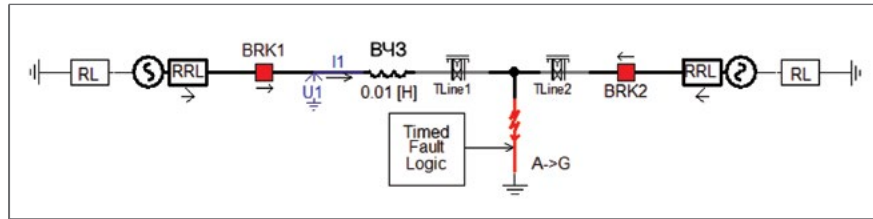


Ключевые слова:  
#определение места повреждения; #воздушная линия электропередачи; #высокочастотный заградитель; #трансформатор напряжения.



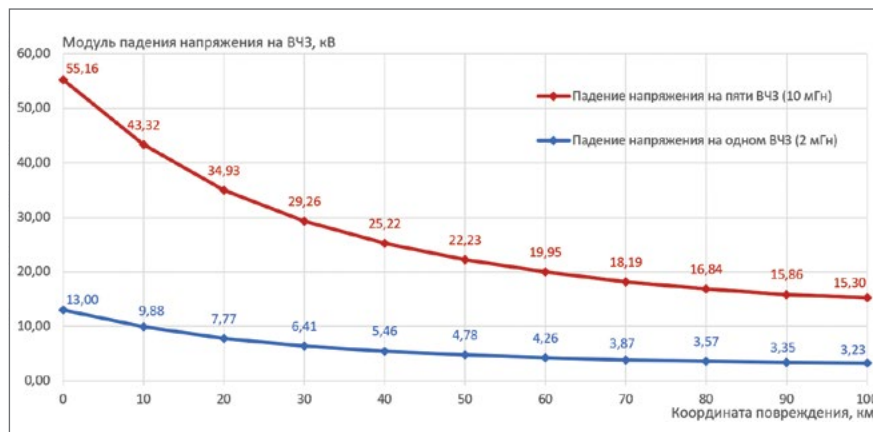
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЛ 500 КВ С ВЧ-ЗАГРАДИТЕЛЯМИ В PSCAD

Рис. 3



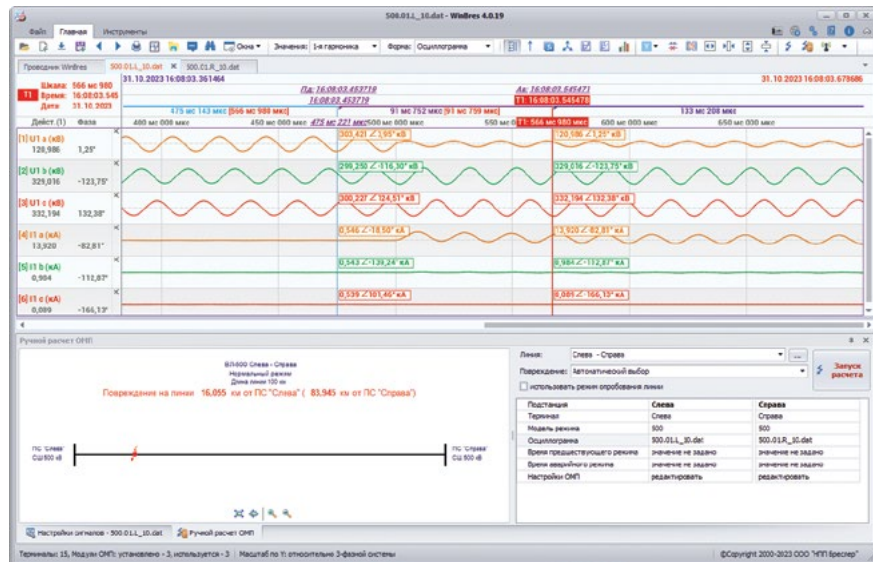
ГРАФИКИ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВЧЗ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ КЗ В РАЗНЫХ ТОЧКАХ ЛИНИИ

Рис. 4



РАСЧЕТ ОМП В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ WINBRES.4

Рис. 5



Оценим падение напряжения на ВЧЗ, от величины которого будет зависеть погрешность ОМП. Для этого в разных точках линии с шагом 10 км имитировались однофазные металлические короткие замыкания (КЗ) фазы А. Модули разницы напряжений с двух сторон ВЧЗ для разных координат повреждений показаны на рисунке 4.

Чтобы оценить, каким образом ВЧЗ на ВЛ влияет на ОМП, использовался программный комплекс WinBres.4, разработанный предприятием ООО «НПП Бреслер». Данный инструмент позволяет выполнить расчет координаты повреждения по цифровым аварийным осциллограммам. На рисунке 5 для примера изображено двухстороннее ОМП для одной из точек повреждений (10-й км линии от левой ПС). Осциллограммы с учетом моделирования подключения по цепям напряжения к ТН-1 получены с помощью вспомогательной программы, позволяющей преобразовать сигналы PSCAD в формат COMTRADE.

Таким образом были получены осциллограммы и выполнены расчеты двухсторонним и односторонними методами ОМП для модели линии, в которой каскад пяти ВЧЗ располагается только на одной (левой) стороне ВЛ. Погрешности ОМП показаны на рисунке 6.

По графикам можно сделать вывод, что наибольшее влияние ВЧЗ оказывает на двухсторонний расчет, и это влияние увеличивается с приближением точки повреждения к левой ПС, на которой расположены заградители. Максимальная погрешность двухстороннего ОМП на графике составила 8,2% в начале линии.

Для одностороннего ОМП ощутимое влияние ВЧЗ наблюдается только при расчете со стороны, на которой находятся заградители. Погрешность одностороннего ОМП в этом случае 4,3–5,6%. При расчете со стороны ПС, на которой ВЧЗ отсутствуют, погрешность одностороннего ОМП не превышает 1%.

Очевидно, что, имея такую конфигурацию ВЛ, предпочтение следует отдать результату ОМП, полученному при одностороннем расчете со стороны правого конца линии.

На следующем рисунке 7 изображены погрешности ОМП для модели, в которой каскад пяти ВЧЗ располагается с обеих сторон ВЛ.

Максимальная погрешность двухстороннего ОМП составила 6% (против 8,2% на предыдущем графике). То есть при расположении ВЧЗ с двух сторон ВЛ погрешность двухстороннего ОМП меньше, чем при наличии ВЧЗ только на одном ее конце.

По мере приближения точки повреждения к центру линии погрешность уменьшается, а в центре она практически отсутствует. Последнее можно связать с выравниванием токов с разных сторон при КЗ в центре рассматриваемой линии. Так как двухсторонний принцип ОМП использует напряжения по концам линии [6], то их изменение на одну и ту же величину (падение напряжения на ВЧЗ) не влияет на результат.

Односторонние расчеты с обеих сторон линии имеют погрешности 4,4–6,2%.

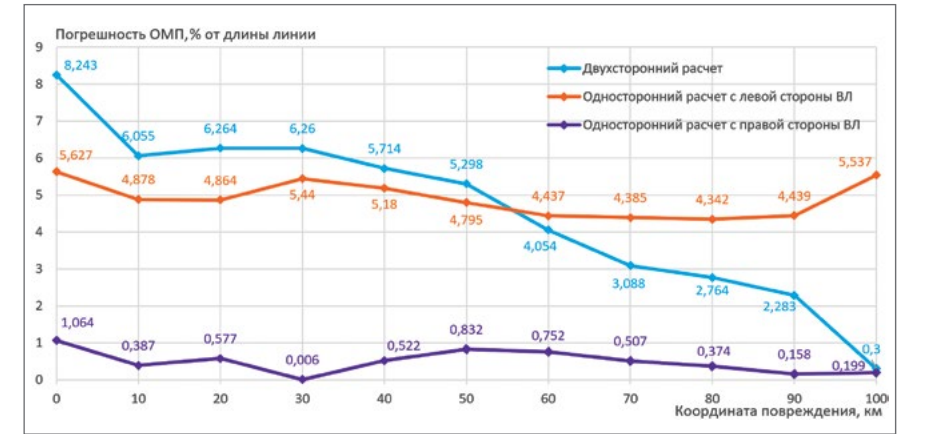
Применение рассмотренного Т-образного фильтра, хотя и взято для конкретной линии, является довольно редким случаем. Поэтому далее оценим погрешности ОМП для модели, в которой учитывается только один ВЧЗ, что соответствует наиболее распространенной схеме ПС. На рисунках 8–9 изображены графики, аналогичные рисункам 6–7 при наличии на ВЛ одного ВЧЗ с одной и с двух сторон ВЛ.

Как видим, погрешности ОМП на всех графиках уменьшились.

Полученные результаты характерны для конкретной конфигурации ВЛ. В общем случае погрешности будут

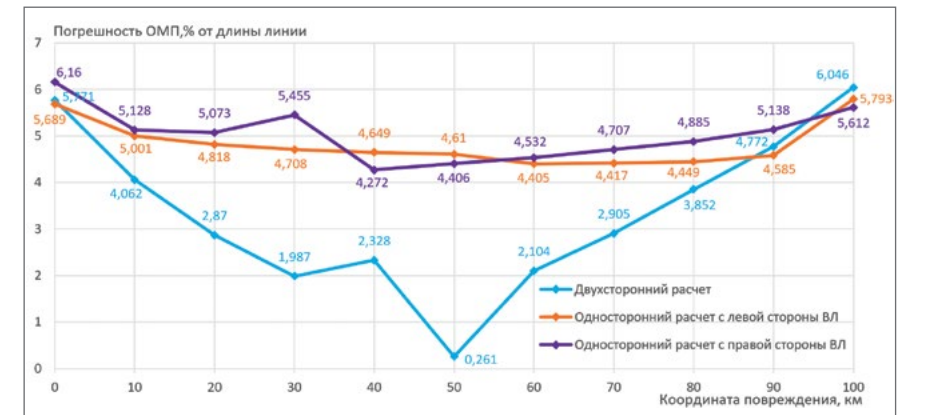
ГРАФИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОМП В РАЗНЫХ ТОЧКАХ ЛИНИИ ПРИ НАЛИЧИИ КАСКАДА ИЗ ПЯТИ ВЧЗ С ОДНОЙ (ЛЕВОЙ) СТОРОНЫ ВЛ

Рис. 6



ГРАФИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОМП В РАЗНЫХ ТОЧКАХ ЛИНИИ ПРИ НАЛИЧИИ КАСКАДА ИЗ ПЯТИ ВЧЗ С ОБЕИХ СТОРОН ВЛ

Рис. 7



меняться в зависимости от аварийного тока, сопротивления ВЧЗ и параметров линии.

Способы учета ВЧЗ для ОМП

При подключении ТН со стороны линии проблема учета ВЧЗ отсутствует. Если по каким-либо причинам для ОМП по параметрам аварийного режима приходится использовать напряжение с ТН, установленных до ВЧЗ, то их необходимо учитывать. Сделать это можно двумя способами.

Первый связан с расчетом падения напряжения на заградителе и переходом к аварийным величинам на стороне линии. Искомые напряжения можно определить по выражению:

$$\bar{U}_{\phi \text{ расч}} = \bar{U}_{\phi} - \bar{I}_{\phi} \cdot jX_{\text{ВЧЗ}}, \quad (1)$$

где  $\bar{U}_{\phi \text{ расч}}$  — расчетное значение напряжения фазы;  $\bar{U}_{\phi}$  — напряжение фазы из осциллограммы;  $\bar{I}_{\phi}$  — ток соответствующей фазы из осциллограммы;

ГРАФИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОМП В РАЗНЫХ ТОЧКАХ ЛИНИИ ПРИ НАЛИЧИИ ОДНОГО ВЧЗ С ОДНОЙ (ЛЕВОЙ) СТОРОНЫ ВЛ

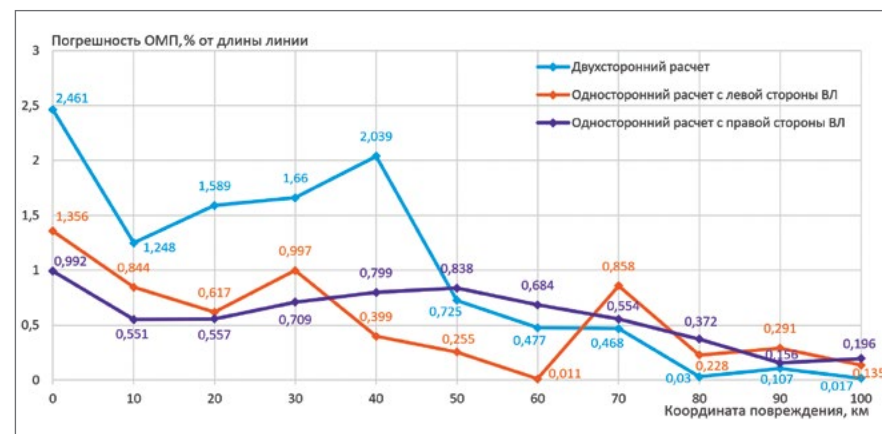


Рис. 8

ГРАФИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОМП В РАЗНЫХ ТОЧКАХ ЛИНИИ ПРИ НАЛИЧИИ ОДНОГО ВЧЗ С ОБЕИХ СТОРОН ВЛ

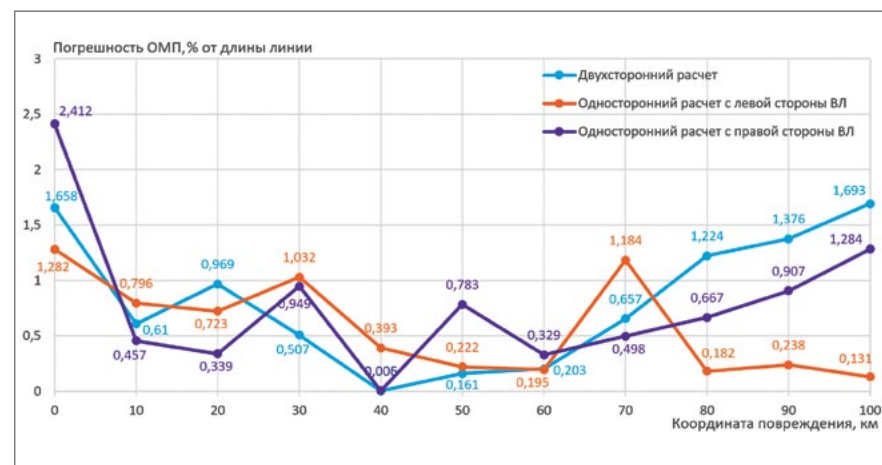


Рис. 9

$X_{ВЧЗ}$  — индуктивное сопротивление ВЧЗ.

Использование расчетных значений напряжений [1] компенсирует падение напряжения на ВЧЗ и тем самым позволяет избежать погрешности ОМП.

Второй способ предполагает описание заградителя в конфигурации линии. Поскольку ВЧЗ является частью конструкции ВЛ, данный способ предложен авторами статьи как приоритетный. Для учета ВЧЗ добавляется участок однородности в начало (конец)

линии с сопротивлением, эквивалентным суммарной индуктивности заградителей.

Данный способ проверен на осциллограммах, которые использовались для расчета погрешностей ОМП на рисунке 6. После того как в конфигурации ВЛ были учтены ВЧЗ, получили следующие результаты ОМП — рисунок 10.

В результате применения предложенного алгоритма удалось снизить

погрешность двухстороннего ОМП с 8,2% до 1,1%, для одностороннего ОМП — с 5,6% до 1,5% (здесь рассматриваются максимальные из полученных погрешностей). Таким образом, подтверждается эффективность предложенного алгоритма.

### Практическая реализация предложенного алгоритма

В предыдущих разделах статьи рассматривалось влияние ВЧЗ на ОМП ВЛ на основании имитационного моделирования. Далее обратимся к реальным аварийным осциллограммам.

Будет рассматриваться ВЛ 500 кВ «Красноармейская — Куйбышевская № 2» (филиал ПАО «Россети» — МЭС Волги) длиной 91,41 км. Выбор данной линии связан с относительно малой длиной и расположением каскада заградителей только с одной стороны линии — на ПС «Куйбышевская», что вызывает наибольшие в процентном соотношении погрешности, а также наличием аварийных событий с найденными координатами повреждений.

Учет заградителей выполнен с помощью описания в начале и конце линии дополнительных участков однородности с параметрами, соответствующими сопротивлению заградителей. Их значения рассчитывались по показаниям регистрирующих устройств, расположенных с двух сторон от ВЧЗ. Суммарное сопротивление каскада ВЧЗ на ПС «Куйбышевская» составило 3,4 Ом для 50 Гц. Со стороны ПС «Красноармейская» подключен только один ВЧЗ с сопротивлением 0,377 Ом.

Двухсторонние и односторонние расчеты выполнялись в WinBres.4 по исходному модулю ОМП, в котором не были учтены ВЧЗ, и по новой модели ВЛ. Результаты ОМП приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы, учет ВЧЗ в модели ВЛ позволил снизить погреш-

РЕЗУЛЬТАТЫ ОМП ДЛЯ ДВУХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВЛ 500 КВ «КРАСНОАРМЕЙСКАЯ – КУЙБЫШЕВСКАЯ № 2» (ДЛИНА 91,41 КМ)

Таблица 1

Дата и время	Фактическое место повреждения от ПС Красноармейская	Двухсторонний расчет		Односторонний расчет от ПС «Красноармейская»		Односторонний расчет со стороны ПС «Куйбышевская»	
		Модель без ВЧЗ	Модель с ВЧЗ	Модель без ВЧЗ	Модель с ВЧЗ	Модель без ВЧЗ	Модель с ВЧЗ
16.07.15 21:04:41	83,3 км	75,38 км (8,66%)	82,9 км (0,44%)	90,65 км (8,04%)	89,82 км (7,13%)	15,9 км (8,52%)	9,04 км (1,01%)
07.06.23 12:12:26	75,8 км	70,11 км (6,24%)	77,51 км (1,87%)	80,95 км (5,63%)	80,29 км (4,91%)	23,04 км (8,18%)	16,18 км (0,62%)

ность для всех приведенных расчетов ОМП.

Важно отметить, что в расчетах использовались реальные осциллограммы устройств РЗА, подключенные к ТН до ВЧЗ со стороны шин ПС. Соответственно, если использовать показания ТН со стороны линии, то ВЧЗ учитывать не следует.

Для того чтобы учесть разные варианты подключения ТН, в программном модуле ОМП WinBres.4 предусмотрена возможность подготовки нескольких режимов работы ЛЭП, каждый из которых представлен своей моделью. Выбор активного режима, то есть модели линии с заградителем или без него, выполняет оператор перед расчетом ОМП.

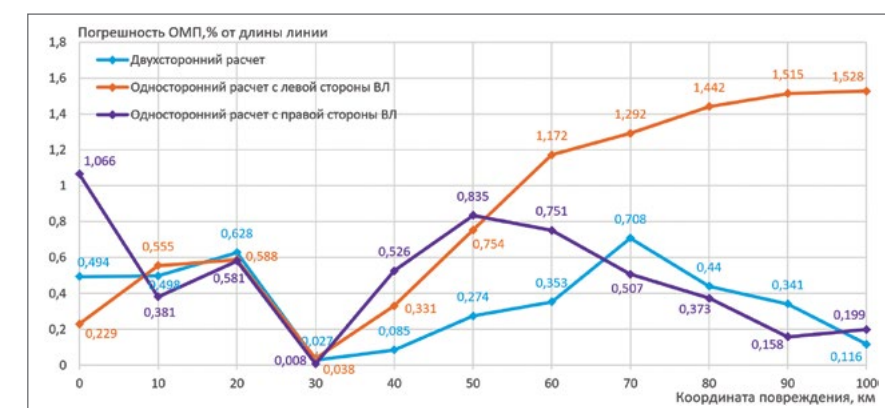
### Заключение

ВЧ-заградители на ВЛ создают погрешность ОМП по параметрам аварийного режима в том случае, если напряжением регистрируются ТН, подключенным перед ВЧЗ со стороны шин ПС.

В статье предложены два способа, позволяющие предотвратить эту погрешность. Первый предполагает приведение значений фазных напряжений к стороне линии с помощью расчета падения напряжения на заградителе. Второй учитывает сопротивление ВЧЗ в модели линии. Алгоритмы разные по своей сути, но приводят к одному результату.

ГРАФИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОМП В РАЗНЫХ ТОЧКАХ ЛИНИИ ПРИ УЧЕТЕ ВЧЗ В КОНФИГУРАЦИИ ВЛ

Рис. 10



Предложенные решения проверены на имитационной модели. Их эффективность подтверждена расчетами ОМП, полученными для реальной ВЛ 500 кВ «Красноармейская — Куйбышевская № 2».

Результатом работы явилось повышение точности ОМП по параметрам аварийного режима.

### ЛИТЕРАТУРА

- Скитальцев Г.В., Скитальцев В.С. Высокочастотная связь по линиям электропередачи: Учебник для техникумов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 448 с.
- СТО 56947007–33.060.04.045–2010 Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения.
- Электронные информационные системы: Высокочастотный заградитель. URL: <https://eisystem.ru/products/hf/hf/> (дата обращения: 30.01.2024).

- СТО 56947007–33.060.04.045–2010 Руководящие указания по выбору частот высокочастотных каналов по линиях электропередачи 35, 110, 220, 330, 500 и 750 кВ.
- Бычков Ю.В., Васильев Д.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели на примере защиты дальнего резервирования и определения места повреждения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 6. С. 63–67.
- Ермаков К.И. Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / К.И. Ермаков. Чебоксары, 2022. 209 с.

Для цитирования: Козлов В.Н., Ермаков К.И., Киришин М.И., Шашкин А.В., Иванов А.Г., Богатков С.В., Строчков А.В. Повышение точности ОМП по параметрам аварийного режима на ВЛ с ВЧ-заградителями // Энергия единой сети. 2024. № 1 (72). С. 52–57.