

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

ТРУДЫ ИГЭУ

Выпуск IX

Под редакцией

*доктора технических наук, профессора В.А. Шуина,
доктора технических наук, профессора М.Ш. Мисриханова,
доктора технических наук, профессора А.В. Мошкарина*

Москва 2009

УДК 621.311

ББК 31.37

П 42

Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX / Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарин. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 572 с.

ISBN 978-5-283-03312-9

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. С.В. Тарарькин,
д-р техн. наук, проф. Б.М. Ларин, д-р техн. наук, проф. М.Ш. Мисриханов,
д-р техн. наук, проф. А.В. Мошкарин, д-р техн. наук, проф. В.Н. Нуждин,
д-р техн. наук, проф. В.А. Савельев, д-р техн. наук, проф. В.А. Строев,
д-р техн. наук, проф. В.А. Шуин, д-р техн. наук, проф. А.В. Шунтов

Рецензенты:

д-р техн. наук, В.Г. Наровлянский (ОАО «Институт Энергосетьпроект», г. Москва);

д-р техн. наук, проф. А.В. Шунтов (Информационно-вычислительный центр Мосэнерго);

д-р техн. наук, проф. Ю.А. Митькин (ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»)

В предлагаемой читателю книге представлены статьи, являющиеся результатами разработок, теоретических и экспериментальных исследований в области теплоэнергетики, электроэнергетики, систем управления и автоматизации, компьютерных технологий, выполненных сотрудниками Ивановского государственного энергетического университета, МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС», а также других вузов, научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организаций.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся исследованием, разработкой, проектированием и эксплуатацией энергетических систем, электрических станций и сетей, комплексов и устройств их автоматического управления.

ISBN 978-5-283-03312-9

© Авторы, 2009

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЭП СВН С ПОМОЩЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОВЫХ МЕТОДОВ

*Д.М. Кудрявцев, канд. техн. наук,
М.Ш. Мисриханов, А.Л. Куликов, доктора техн. наук*

Одним из важнейших объектов Единой Национальной Электрической Сети России являются линии электропередачи. Важным для успешной работы линий электропередач (ЛЭП) СВН является своевременное точное определение мест повреждений (ОМП). В практике работы предприятий электрических сетей, как правило, применяются приборы для решения задач ОМП ЛЭП СВН, основанные на определении параметров аварийного режима [1, 2].

Ниже предлагается метод ОМП, базирующийся на излучении квазинепрерывных гармонических сигналов и фазовых измерениях, аналогичный фазовым методам дальнометрии.

Фазовые методы дальнометрии используются в радиотехнических системах для измерения дальности и основываются на измерении приращения фазы излученного гармонического колебания стабилизированной частоты за время запаздывания отраженного сигнала [3, 4]. Подобный принцип можно использовать для определения места повреждения на линиях электропередач. Для исследования возможностей применения фазового метода дальнометрии к задачам ОМП рассмотрим идеализированный пример, когда в среде распространения имеется единственный отражатель (рис. 1).



Рис. 1. Идеализированный пример применения фазового метода дальнометрии

Передатчик излучает синусоидальное колебание частоты f_0 с некоторой начальной фазой φ_0 :

$$\varphi_{пер} = 2\pi f_0 t + \varphi_0. \quad (1)$$

Отраженный сигнал поступает в приемник с фазой

$$\varphi_{np} = 2\pi f_0(t - t_s) + \varphi_0 + \Delta\varphi, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ – сдвиг фазы при отражении (как правило, близок к 180°). Далее считаем $\Delta\varphi$ известной величиной. Время запаздывания t_s , однозначно определяющее дальность до отражателя (точка O), рассчитывается как

$$t_s = \frac{2D}{c}, \quad (3)$$

где c – скорость света, а фазовый набег составит

$$\theta = \varphi_{nep} - \varphi_{np} = 2\pi f_0 t_s - \Delta\varphi = \frac{4\pi f_0 D}{c} - \Delta\varphi.$$

Учитывая известное $\Delta\varphi$, приходим к уравнению

$$\theta + \Delta\varphi = \frac{4\pi f_0 D}{c}.$$

Через измеряемую разность фаз

$$\theta' = \theta + \Delta\varphi \quad (4)$$

из последнего уравнения выразим дальность D до места отражения (повреждения):

$$D = \frac{(\theta + \Delta\varphi)c}{4\pi f_0}. \quad (5)$$

Частота f_0 и длина волны $\lambda = \frac{c}{f_0}$ называются масштабными, поскольку

от них зависит масштаб измерения дальности, т.е. коэффициент между измеряемым фазовым сдвигом θ' и дальностью до места повреждения D . Через фазовые интервалы $\theta' = 2\pi$ гармоническое колебание, а вместе с ним и показания фазометра повторяются (рис. 2).

Таким образом, согласно выражению (5), диапазон однозначного измерения дальности будет составлять

$$D_{одн} = \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

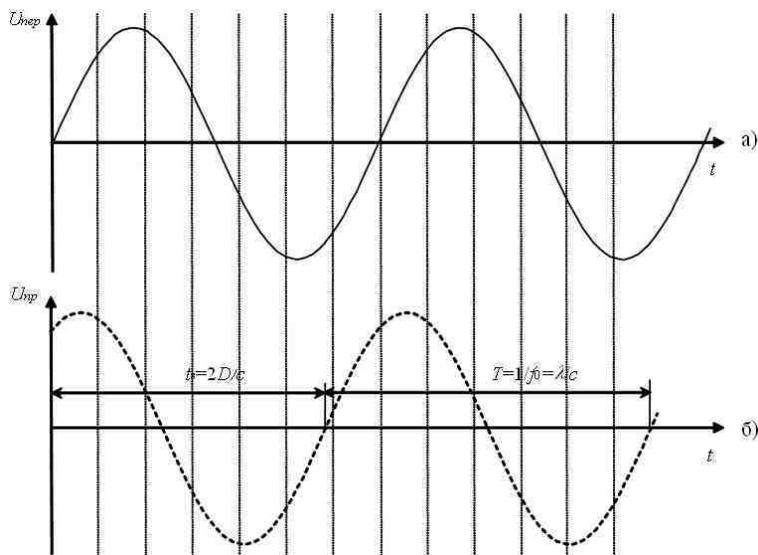


Рис. 2. Зависимость напряжения передатчика (а) и приемника (б) от времени

Выбирая длину волны в соответствии с (б), можно обеспечить измерения дальности в любых диапазонах. Так, например, для $D_{max} = D_{одн} = 300$ км требуется длина волны $\lambda = 600$ км и соответствующая масштабная частота $f_0 = 500$ Гц. При этом инструментальная точность измерения дальности оказывается измеренной и составляет 0,8 км на каждый градус шкалы фазометра.

Существенной особенностью и методическим ограничением фазовых методов является необходимость разнесенного приема-передачи при излучении непрерывных колебаний (рис. 1). Одновременно излучение и прием гармонических колебаний на фиксированной частоте в ЛЭП реализовать невозможно. Для преодоления указанного ограничения нами предлагается использование квазинепрерывных колебаний (например, рис. 3) с последующим восстановлением непрерывного колебания.

При этом исходное непрерывное колебание заменяется соответствующими периодическими отрезками (импульсами). Период следования отрезков (импульсов) и их длительность определяют условия проведения измерений и могут изменяться для достижения наивысшей точности оценок дальности. Упрощенная схема, реализующая фазовый метод измерений с поочередным излучением в ЛЭП и приемом квазинепрерывных

гармонических колебаний при соответствующей схеме высокочастотной обработки, изображена на рис. 4.

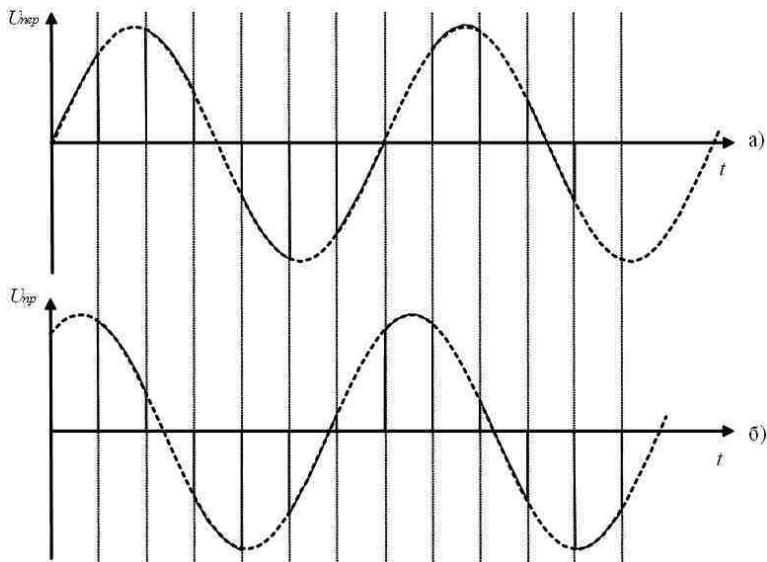


Рис. 3. Квазинепрерывные гармонические сигналы передачи (а) и приема (б)

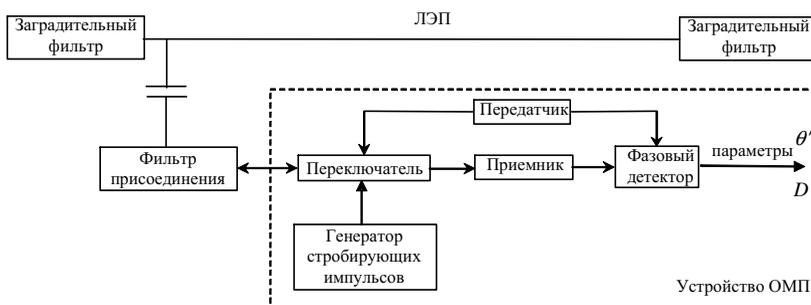


Рис. 4. Схема, реализующая фазовый метод измерений

Фазометр (фазовый детектор) может быть выполнен по любой из существующих схем [3, 4]. Один из вариантов цифровой реализации представлен на рис. 5.

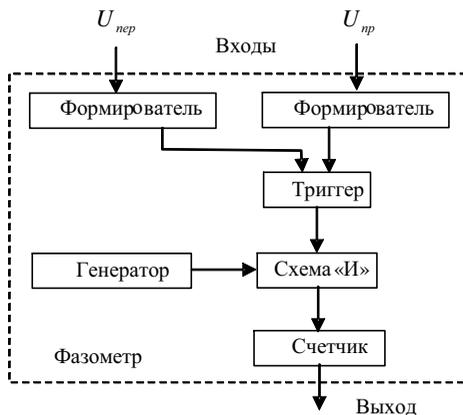


Рис. 5. Цифровая реализация фазового детектора

В цифровом фазометре формирующие каскады преобразуют переходы через нуль опорного $U_{пер}$ и отраженного $U_{пр}$ синусоидального сигнала в серии импульсов, управляющих триггером. Длительность импульса триггера определяется фазовым сдвигом θ (дальностью). На схему «И» поступают импульсы генератора и разрешающий импульс триггера, поэтому на выходе схемы «И» образуется результат в виде N импульсов, количество которых пропорционально θ (дальности). Счетчик ведет подсчет импульсов эталонного генератора, следующих с периодом

$$T_i = \frac{2dD}{c}, \quad (7)$$

где dD – элементарный отрезок дальности. При этом

$$D = NT_i = \frac{2N}{c} dD, \quad (8)$$

чем меньше T_i и стабильнее генератор эталонных импульсов, тем выше точность измерений. Здесь дисперсия инструментальной ошибки, связанная с дискретностью отсчетов дальности, определяется в отсутствии шума [4]:

$$\sigma_D^2 = \frac{dD^2}{12}. \quad (9)$$

Возможны и другие подходы к реализации фазовых измерений. При построении приборов ОМП с использованием ПЭВМ целесообразно применять для оценки разности фаз колебаний процедуры спектрального анализа [5], основанные, например, на дискретном (быстром) преобразовании Фурье.

Анализируя потенциальную точность измерения дальности фазовым методом, следует отметить, что масштабная частота f_0 существенно влияет на точность определения дальности. Действительно, если фазометр измеряет θ со среднеквадратической ошибкой σ_θ , то среднеквадратическая ошибка измерения дальности в соответствии с (5) составляет

$$\sigma_D = \frac{c\sigma_\theta}{4\pi f_0} = \frac{\lambda\sigma_\theta}{4\pi}. \quad (10)$$

Шумы трактов высокочастотной обработки ЛЭП существенно сказываются на оценке фазового сдвига θ , причем с увеличением отношения сигнал/шум q [4] ошибка оценки фазового сдвига уменьшается ($\sigma_\theta \sim \frac{1}{\sqrt{q}}$). С учетом изложенного, потенциально достижимую среднеквадратическую ошибку однозначного измерения дальности фазовым методом можно найти из выражения

$$\sigma_D = \frac{c}{4\pi f_0 \sqrt{q}} = \frac{\lambda}{4\pi \sqrt{q}}. \quad (11)$$

Совместный анализ выражений (6) и (11) приводит к противоречию, присущему фазовым методам [3]: увеличение масштабной частоты способствует увеличению точности измерений, но уменьшает предел однозначно определяемой дальности.

Разрешающая способность по дальности для фазового метода, т.е. способность производить измерения в случае наличия других отражений, кроме отражения от искомого места повреждения определяется шириной пика автокорреляционной функции по оси времени [4]

$$\Delta D = \frac{c}{2\Delta f} = \frac{ct_{узл}}{2}, \quad (12)$$

которая пропорциональна $t_{узл}$ и обратно пропорциональна ширине спектра

ра сигнала Δf . Поскольку для гармонического (мономатического) сигнала $t_{изл}\Delta f = 1$, то при $\Delta f \rightarrow 0$ ($t_{изл} \rightarrow \infty$)

$$\Delta D = \infty, \quad (13)$$

т.е. разрешающая способность по дальности у фазовой системы отсутствует (очень плохо). Действительно, при сколь угодно большом расстоянии между отражателями (местами повреждений, отпайками ЛЭП) сигналы, отраженные от них, перекрываются во времени, поскольку их длина $t_{изл} \rightarrow \infty$. Две синусоиды бесконечной длительности и одной частоты f_0 всегда перекрываются и складываются таким образом, что в результате невозможно судить о количестве и параметрах слагаемых.

Разрешающая способность по частоте [4] равна ширине спектра, и для мономатического колебания

$$\Delta F = \Delta f = 0,$$

т.е. наилучшая из всех возможных. Разрешающая способность по частоте характеризует частотную селекцию, т.е. влияние колебаний частот, близких к f_0 , на процесс измерения дальности. Тело неопределенности [4] (рис. 6) представляет тонкую полосу вдоль оси τ постоянной высоты в плоскости $F = 0$. Его поперечное сечение вдоль оси F является в пределе дельта-функцией, что обеспечивает идеальное разрешение по частоте. На практике в силу ограниченной протяженности синусоидального колебания $t_{изл,1}$ разрешающая способность по частоте ограничена величиной $1/t_{изл,1}$.

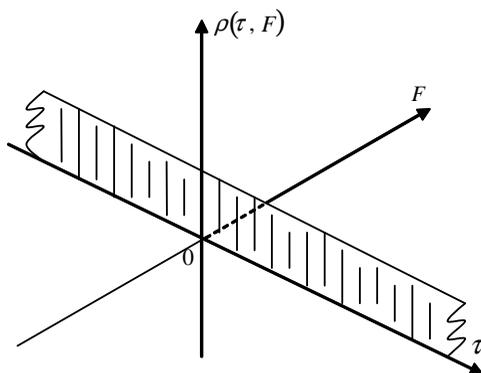


Рис. 6. Двухмерная автокорреляционная функция (тело неопределенности) гармонического сигнала

Отсутствие разрешающей способности по дальности означает не столько невозможность различить два различных отражателя (место повреждения, отпайки и др.), сколько ошибочность результатов измерения дальности. На рис. 7 показана векторная диаграмма, где $\varphi_{пер}$ – фаза вектора опорного сигнала масштабной частоты f_0 , поступающего на фазометр от передатчика; φ_1 и φ_2 – фазы, например, сигналов, отраженных от места повреждения и отпайки и поступающих на фазометр от приемника. Дальность до места повреждения 1 определяется разностью фаз θ_1 (без учета возможных неоднозначностей), а от отпайки 2 – разностью фаз θ_2 .

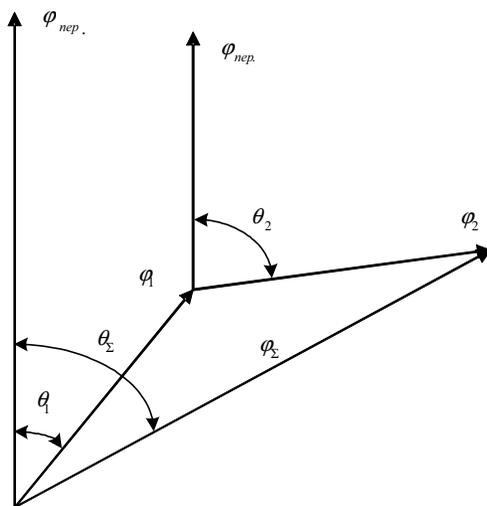


Рис. 7. Пример векторной диаграммы для передающего и приемного сигналов

Две синусоиды одинаковой частоты, поступая на вход приемника с фазами φ_1 и φ_2 , складываются и дают одну синусоиду той же частоты с фазой φ_{Σ} , отличной от φ_1 и φ_2 и не позволяющей определить отдельно θ_1 и θ_2 . Разность фаз для этой синусоиды θ_{Σ} отличается от θ_1 и θ_2 и не соответствует дальности ни того, ни другого отражателя.

Таким образом, отсутствие разрешающей способности по дальности у фазовых методов приводит к ограничениям в их использовании. Следует рекомендовать их применение в сочетании с другими методами дальнометрии, например импульсными, для уточнения дальности

сти до места повреждения. При этом после применения импульсного метода, обладающего более низкой точностью, применяется фазовый метод с квазинепрерывным сигналом, параметры которого определяются исходя из предварительной оценки дальности. Селекция по дальности в анализируемом диапазоне достигается набором соответствующих параметров стробирующих импульсов, подаваемых на переключатель (рис. 4).

Еще одним из существенных недостатков упрощенного фазового метода является проникновение зондирующего сигнала непосредственно в приемник. Мощность сигнала передатчика во много раз превышает мощность сигнала, отраженного от места повреждения. Проникающий в приемник зондирующий сигнал равносильно сильному отраженному сигналу от места повреждения с нулевой дальностью и приводит к перегрузке приемника. Поэтому для реализации фазового метода с квазинепрерывными сигналами необходимо обеспечить требуемую развязку между приемником и передатчиком.

Отмеченный выше недостаток фазового метода, связанный с неоднозначностью измерения дальности (или малым диапазоном ее однозначного измерения), устраняется с помощью введения разновидности фазовых дальнометров [3, 4].

Таким образом, возможно решение задачи ОМП ЛЭП с использованием фазовых методов. Преимущественным является сочетание фазовых методов ОМП ЛЭП с другими методами ОМП для повышения точности полученных результирующих оценок расстояния до места повреждения.

Предварительный анализ рассмотренного устройства для ОМП фазовым методом (рис. 4, 5) позволяет судить о его достаточно простой технической реализации.

Библиографический список

1. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г.М. Шалыт. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
2. Аржаников, Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е.А. Аржаников, В.Ю. Лукоянов, М.Ш. Мисриханов; под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
3. Радиотехника: энциклопедия / под ред. Ю.Л. Мазора, Е.А. Мачусского, В.И. Правды. – М.: издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 944 с.
4. Радиозлектронные системы: основы построения и теория: справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
5. Марпл-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. / С.Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

УДК 621.311

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЭП НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ И НАВИГАЦИИ

А.Л. Куликов, д-р техн. наук

К числу методов определения места повреждений (ОМП) линий электропередачи (ЛЭП) относят так называемые волновые методы [1]. Они основаны на измерении разности во времени достижения концов линии фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения и распространяющихся по линии в обе стороны от места повреждения.

Суть физической основы методов достаточно подробно описана в литературе [1 – 10], ее иллюстрирует рис. 1, где показан один провод линии электропередачи длиной L , который в момент повреждения $t = 0$ заряжен до напряжения U . При возникновении пробоя изоляции провода на землю в некоторой точке, удаленной от конца линии на расстояние L , происходит падение напряжения до нуля. В месте повреждения возникают электромагнитные волны напряжением $(-U)$, стремящиеся со скоростью \vec{V} распространить нулевой потенциал по всей линии. Через временные интервалы запаздывания

$$t_{31} = \frac{L - \ell}{V} \text{ и } t_{32} = \frac{\ell}{V} \quad (1)$$

фронты волн достигают концов линии. Разность времен распространения (запаздывания)

$$\Delta t_3 = t_{32} - t_{31} = \frac{\ell}{V} - \frac{L - \ell}{V} = \frac{2\ell}{V} - \frac{L}{V} \quad (2)$$

определяет расстояние до места повреждения

$$\ell = \frac{L}{2} + \frac{\Delta t_3}{2} V. \quad (3)$$

Поскольку скорость \vec{V} распространения фронтов напряжения соизмерима со скоростью света, то для приемлемой ошибки ОМП должна

быть обеспечена точность измерения разности времени запаздывания Δt , порядка микросекунд и соответствующая синхронизация отсчета времени на обоих концах линии.

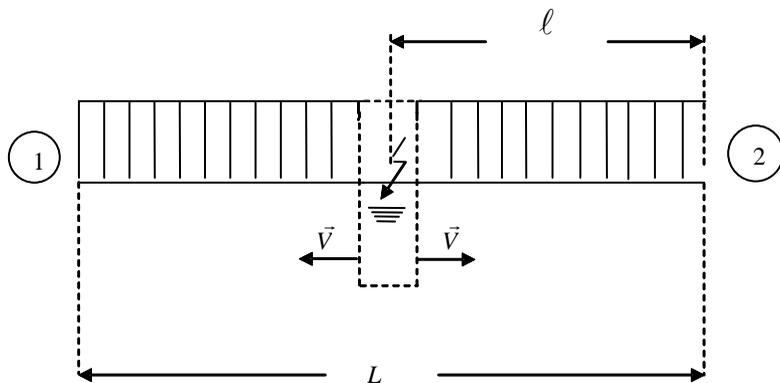


Рис. 1. Диаграмма распространения волн

В технической литературе [1 – 7], посвященной волновым методам ОМП ЛЭП, приводятся способы предварительной и последующей отправки синхронизирующих сигналов для реализации точного отсчета времени счетчиками на концах линии. Тем не менее отмечается невысокая точность устройств ОМП, вызванная проблемами синхронизации, усложнение схемных решений, низкая надежность и достоверность функционирования устройств, связанные с влиянием помех. Типовая схема устройства ОМП [7], реализующая волновой метод двухсторонних измерений, представлена на рис. 2. Следует отметить, что в качестве среды передачи информации могут использоваться различные виды связи:

- традиционная проводная на базе медных и оптических линий;
- беспроводная: радиосвязь, спутниковая, оптические системы передачи информации и др.;
- связь по линиям электропередачи и др.

Существенное развитие волновых методов двухсторонних измерений связано с развитием систем спутниковой навигации. Анализ научно-технической литературы свидетельствует, что последние патенты японских и американских компаний, работающих в этом направлении, например, [8, 9, 10], связаны с применением GPS (Global Positioning System) систем спутниковой навигации. Структурная схема такого волнового устройства ОМП приобретает вид, показанный на рис. 3.

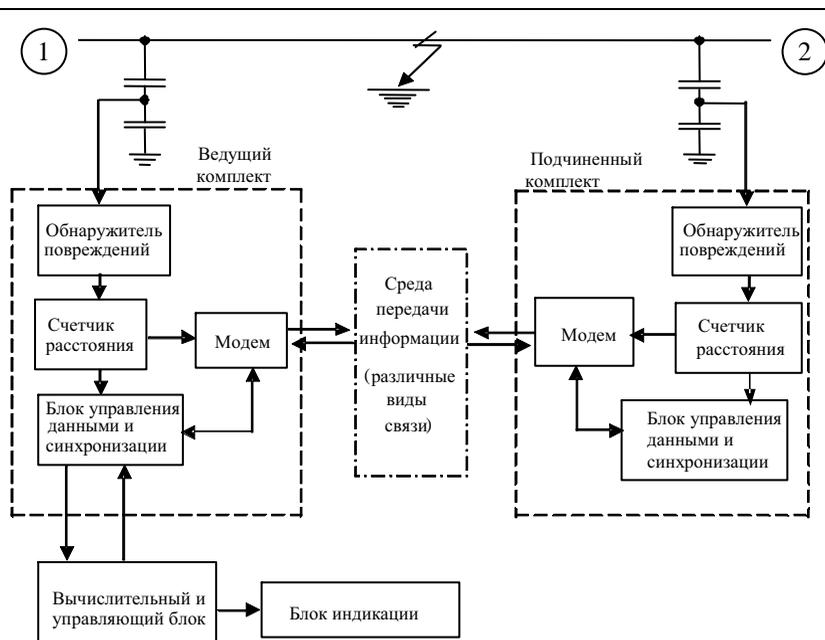


Рис. 2. Волновое устройство ОМП с предварительными синхронизирующими сигналами

Синхронизация с использованием сигнала от GPS-спутника производится следующим образом. Спутником излучается два типа закодированной информации, именуемой «C/A кодом» (Coarse Acquisition Code) и «P кодом». Код C/A доступен для общего (гражданского) применения. Кодированная информация формируется генератором, основанным на атомных часах GPS-спутника. Таким образом, использование синхронизации от этого генератора обеспечивает точный временной отсчет. Код C/A – это 1023-битовый сигнал периода 1 мс, передаваемый посредством фазовой модуляции на несущей частоте порядка 1,5 – 1,6 ГГц.

Задержка электромагнитной волны от спутника до GPS-приемника устройства ОМП возникает из-за прохождения через ионосферу, атмосферу и ряда других факторов. Ее компенсация может быть достигнута с высокой точностью и стабильностью и путем введения корректирующей модели с учетом орбитального движения навигационного аппарата.

В GPS-часах приемника волнового устройства ОМП производится корреляционная обработка C/A кода, полученного со спутника, подстраивается фаза генератора, формирующего аналогичный C/A код.

При подстройке учитываются ранее рассмотренная корректировка внешней задержки, а также внутренние задержки и ошибки часов приемника. В итоге возможно построение общей корректирующей модели, включающей компенсацию внешних и внутренних факторов нестабильности измерения временных параметров. По оптимистическим оценкам [8, 9, 10], точность синхронизации отсчетов времени на концах ЛЭП для волнового метода двухсторонних измерений может быть достигнута в пределах $10^{-8} - 10^{-7}$ с, что соответствует точности ОМП 3 – 30 м.

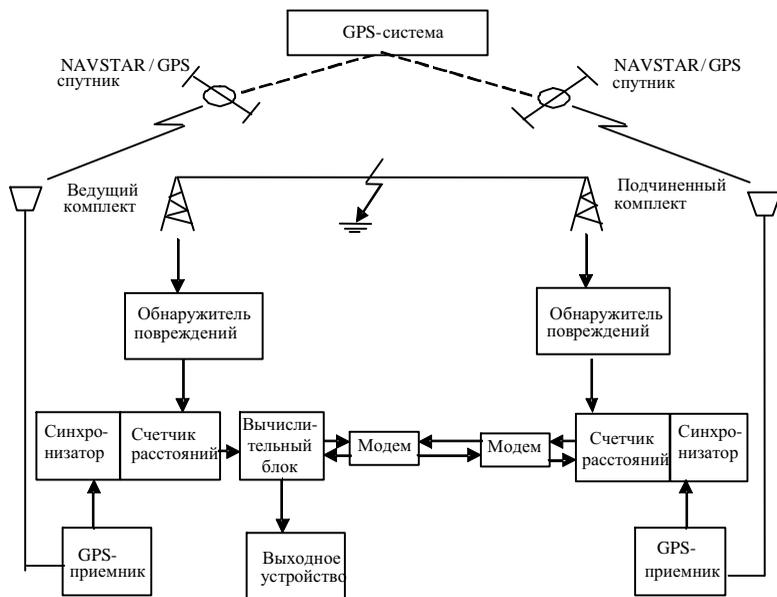


Рис. 3. Волновое устройство ОМП с использованием системы спутниковой навигации

Однако наряду с синхронизацией временных измерений на концах ЛЭП для волновых методов отдельной проблемой является искажение (разрушение формы) и «затягивание» фронтов волновых процессов. Следует отметить, что для линий сверхвысокого напряжения такое воздействие является значительным и определяется:

- неодинаковостью пути прохождения волновых процессов к концам ЛЭП;
- случайностью параметров линии (конструкции и параметров ее отдельных участков);

– воздействием внешних случайных факторов и помех, спецификой электромагнитной обстановки;

– состоянием изоляции, погодными условиями и др.

Характер «затягивания» фронтов волновых процессов, связанных с реактивными составляющими сопротивления ЛЭП, можно оценить по аналогичному эффекту для импульсных методов [2], где в результате для ЛЭП 110 – 220 кВ такие ошибки ОМП могут достигать 400 м.

Характер воздействия внешних и внутренних случайных факторов ЛЭП, искажающих преимущественно форму волновых процессов, практически не изучен. Соответственно, не определены влияние случайных искажений на точность ОМП и методы компенсации этого влияния. Комплексное решение проблем волновых методов ОМП (синхронизация, затягивание фронтов и их искажение) возможно при использовании теории и техники радиоэлектронных систем [11, 12].

При этом с точки зрения локационно-навигационных подходов рассмотренное устройство ОМП (рис. 3) можно интерпретировать как традиционную систему пассивной спутниковой навигации. Существенно, что более глубокое использование таких подходов [12] может не только расширить понимание физических процессов, возникающих в процессе обработки информации волновыми устройствами ОМП, но и коренным образом изменить ее характер.

Рассмотрим упрощенный пример (рис. 4) – ограничимся представлением волнового устройства ОМП двухсторонних измерений через локационную пассивную двухпозиционную систему. Волновые процессы, распространяющиеся к пунктам приема в общем случае представляют собой случайные процессы, параметры которых зависят от условий распространения (конструкции и параметров участков ЛЭП, погодных условий и др.). Условимся, что прием ведется на фоне пространственно некоррелированных помех двумя пунктами, разнесенными в пространстве на расстояние (базу) L .

В пунктах приема наблюдаются реализации совокупного случайного процесса

$$\begin{aligned} y_1(t) &= x(t - t_{31}) + n_1(t), \\ y_2(t) &= x(t - t_{32}) + n_2(t) \end{aligned} \quad (4)$$

на интервале наблюдения $0 < t < T_n$. Здесь $t_{31,2}$ – время запаздывания волнового процесса (сигнала) $x(t)$ в пунктах приема; $n_1(t)$ и $n_2(t)$ – помехи в каналах приема.

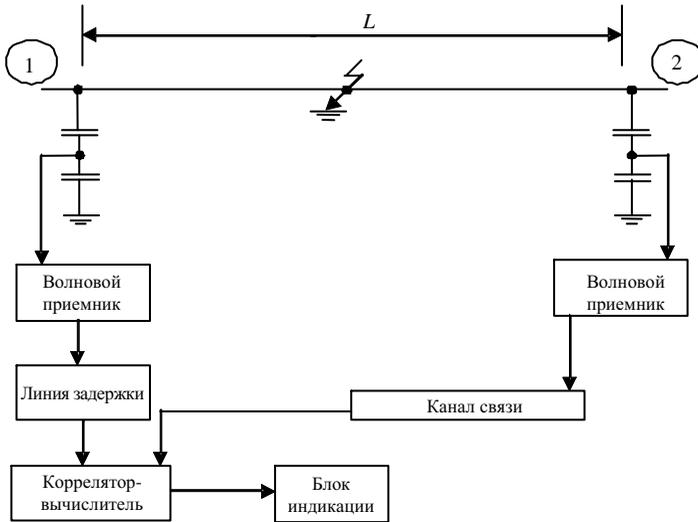


Рис. 4. Упрощенное волновое устройство ОМП с использованием методов пассивной локации

Предварительный анализ будем вести для особого случая, когда повреждение происходит в точке $L/2$ и взаимное запаздывание на концах ЛЭП (пунктах приема) выравнено, т.е. $t_{31} = t_{32}$. Физическая интерпретация такого случая будет дана ниже.

Обозначим дисперсии сигнала и помехи соответственно σ_c^2 и σ_n^2 , тогда

$$M[y_1^2] = M[y_2^2] = \sigma_c^2 + \sigma_n^2. \quad (5)$$

Введем коэффициент корреляции процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$

$$\rho_{12} = M[y_1 y_2] / M[y_1^2] \cdot M[y_2^2],$$

который с учетом некоррелированности помех равен

$$\rho_{12} = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}. \quad (6)$$

Соотношение (5) с учетом (6) приобретает вид

$$M[y_1^2] = M[y_2^2] = \frac{\sigma_n^2}{1 - \rho_{12}}. \quad (7)$$

Считаем, что приемники реализуют цифровую обработку дискретных реализаций $y_1(t), y_2(t)$:

$$y_1(t) \rightarrow \vec{Y}_1 = \begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{12} \\ \vdots \\ y_{1N} \end{pmatrix}; y_2(t) \rightarrow \vec{Y}_2 = \begin{pmatrix} y_{21} \\ y_{22} \\ \vdots \\ y_{2N} \end{pmatrix},$$

где N – число дискрет на интервале наблюдения T_n :

$$N = \frac{T_n}{\Delta t} = f_d T_n, \quad (8)$$

f_d и Δt – частота и интервал дискретизации соответственно.

Объединим векторы \vec{Y}_1 и \vec{Y}_2 в один вектор \vec{Y} :

$$\vec{Y}^T = \|y_{11} \quad y_{21} \quad y_{12} \quad y_{22} \quad \dots \quad y_{1N} \quad y_{2N}\|^T.$$

Исходя из принятых моделей волновых процессов (сигнала) и помехи, будем полагать, что распределения реализаций при наличии сигнала описываются двумерным нормальным законом вида

$$p_{cn}(\vec{Y}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_n^2\sqrt{1+\rho_{12}})^N} \exp \left[-\frac{\sum_{i=1}^N (y_{1i}^2 + y_{2i}^2 - 2\rho_{12}y_{1i}y_{2i})}{2\sigma_n^2(1+\rho_{12})} \right], \quad (9)$$

а помехи –

$$p_n(\vec{Y}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_n^2)^N} \exp \left[-\frac{\sum_{i=1}^N (y_{1i}^2 + y_{2i}^2)}{2\sigma_n^2} \right]. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) позволяют использовать статистическую оценку расстояния до места повреждения – отношение правдоподобия

$$\ell(\vec{Y}) = \frac{1}{(1 + \rho_{12})^{N/2}} \exp \left[\frac{\rho_{12}}{2\sigma_n^2(1 + \rho_{12})} \sum_{i=1}^N (y_{1i} + y_{2i})^2 \right] \quad (11)$$

или корреляционной суммы

$$Z = \sum_{i=1}^N (y_{1i} + y_{2i})^2 = \sum_{i=1}^N y_{1i}^2 + \sum_{i=1}^N y_{2i}^2 + 2 \sum_{i=1}^N y_{1i} y_{2i} . \quad (12)$$

Теоретически выражениям (11) и (12) соответствуют структуры устройств обработки, включающие два (рис. 5, а) и три (рис. 5, б) канала обработки. Однако для оценки разности времени запаздывания Δt_3 , определяющей место повреждения, достаточно использование лишь коррелятора для определения взаимно-корреляционной функции случайных процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ на интервале наблюдения T_n :

$$\begin{aligned} \varphi_{12}(\Delta t_3) &= \int_0^{T_n} y_1(t) y_2(t) dt = \int_0^{T_n} x_1(t - t_{31}) x_2(t - t_{32}) dt + \\ &+ \int_0^{T_n} n_1(t) n_2(t) dt + \int_0^{T_n} x_1(t - t_{31}) n_2(t) dt + \int_0^{T_n} n_1(t) x_2(t - t_{32}) dt . \end{aligned} \quad (13)$$

В силу некоррелированности компонент последние три интеграла обращаются в нуль. В итоге взаимокорреляционная функция процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ может быть выражена через автокорреляционную функцию относительно аргумента $\tau - \Delta t_3$:

$$\varphi_{12}(\tau) = \int_0^{T_n} x(t - t_{31}) x(t - t_{32}) dt = \varphi(\tau - \Delta t_3) . \quad (14)$$

Максимум автокорреляционной функции $\varphi(\tau - \Delta t_3)$ сдвинут относительно максимума $\varphi(\tau)$ на величину Δt_3 . Это обстоятельство при соответствующей градуировке шкалы измерителя можно использовать для измерения Δt_3 , а следовательно, и разности расстояний до концов ЛЭП.

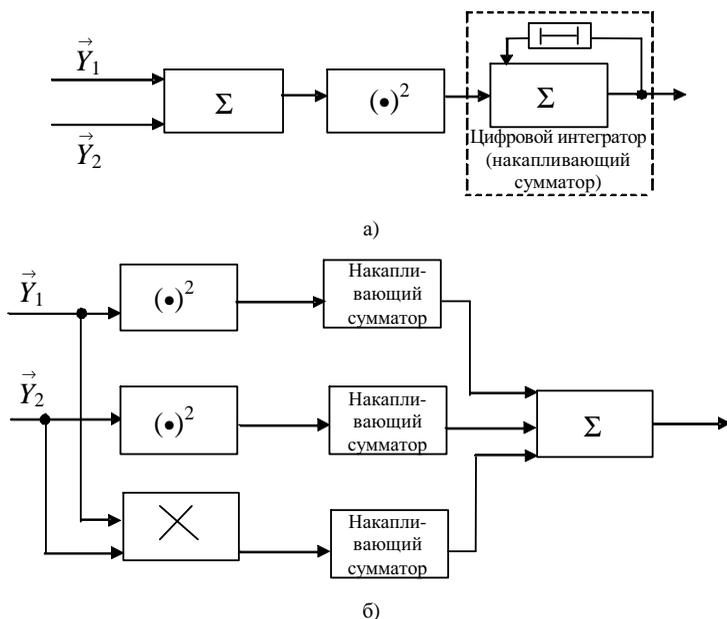


Рис. 5. Вычислители корреляционной суммы

На практике получили распространение корреляторы с последовательным и параллельным обзором. Последовательный обзор (рис. 6) по параметру τ может осуществляться в корреляторах с плавной управляемой линией задержки (в цифровом виде – блоком регистров).

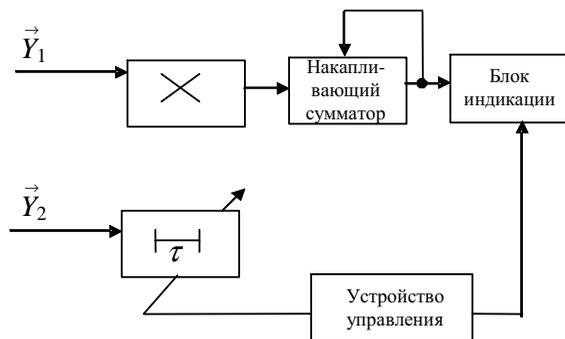


Рис. 6. Коррелятор с последовательным обзором

В корреляторе параллельного действия (рис. 7) сокращение времени обзора по параметру τ достигается увеличением числа каналов, что ведет к усложнению обработки. Однако в связи с повышением производительности и сокращением массо-габаритных характеристик вычислительных средств усложнение оказывается не существенным.

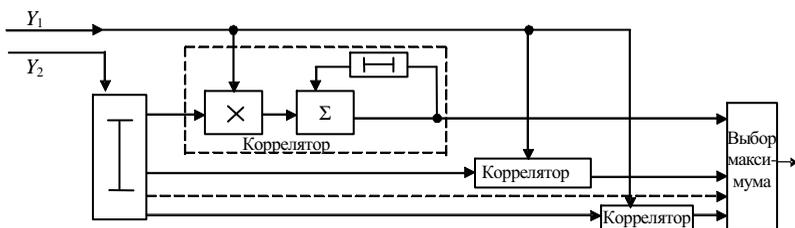


Рис. 7. Коррелятор с параллельным обзором

Отметим, что уменьшение времени усреднения (накопления) T_n связано с ухудшением точностных характеристик оценки времени запаздывания. Возникающий при этом шумовой фон эквивалентен помехе, поэтому по аналогии с обнаружением [11, 12] вводят понятие отношения сигнал-помеха q^2 на выходе коррелятора.

Под сигналом понимается математическое ожидание оценки взаимной корреляционной функции $M[\hat{\varphi}(\tau)]$. Маскирующий (шумовой) фон характеризуют дисперсией оценки

$$D\{\hat{\varphi}(\tau)\} = M\{\hat{\varphi}^2(\tau)\} - \{M[\hat{\varphi}(\tau)]\}^2. \quad (15)$$

При этом отношение сигнал-помеха определяют соотношением

$$q^2 = \{M[\hat{\varphi}(\tau)]\}^2 / D\{\hat{\varphi}(\tau)\}. \quad (16)$$

Приведем упрощенный метод расчета q^2 , соответствующий простейшей схеме коррелятора (рис. 5) с выравненными по времени задержки колебаниями $y_1(t)$ и $y_2(t)$. Переходя к цифровой обработке векторов \vec{Y}_1 , \vec{Y}_2 , найдем сначала отношение (15) для первой во времени пары коррелированных по каналам дискрет y_{11} и y_{21} :

$$q_{12}^2 = [M(y_{11}, y_{21})]^2 / D(y_{11}, y_{21}), \quad (17)$$

где $M(y_{11}, y_{21}) = \varphi_{12}$ и $D(y_{11}, y_{21}) = M(y_{11}^2, y_{21}^2) - [M(y_{11}, y_{21})]^2$ – первый и второй взаимные корреляционные моменты случайных дискрет y_{11} и y_{21} . Используя известное выражение для корреляционного момента четвертого порядка $M(y_{11}^2, y_{21}^2) = \varphi_{11}\varphi_{22} + 2\varphi_{12}^2$ и определяя $D(y_{11}, y_{21}) = \varphi_{11}\varphi_{22} + \varphi_{12}^2$, получим

$$q_{12}^2 = \varphi_{12}^2 / (\varphi_{11}\varphi_{22} + \varphi_{12}^2). \quad (18)$$

Вводя взаимный коэффициент корреляции

$$\rho_{12} = \varphi_{12} / \sqrt{\varphi_{11}\varphi_{22}}, \quad (19)$$

последнее соотношение можно записать в виде

$$q_{12}^2 = \rho_{12}^2 / (1 + \rho_{12}^2). \quad (20)$$

При наличии $N = T_{if}f_b$ пар дискрет $y_{1i}y_{2i}$ результирующее отношение сигнал-помеха увеличивается в N раз по сравнению с q_{12}^2 . Физически это объясняется тем, что среднее значение выходного эффекта интегратора коррелятора возрастает пропорционально N , а среднеквадратическое – \sqrt{N} [12]. В результате для отношения сигнал-помеха получим выражения

$$q^2 = \rho_{12}^2 N / (1 + \rho_{12}^2), \quad q = \rho_{12} \sqrt{N / (1 + \rho_{12}^2)}. \quad (21)$$

По известному значению g^2 можно приближенно оценить дисперсию ошибки оценочного значения τ [11, 12], определяющего точные характеристики волнового ОМП с учетом корреляционной обработки:

$$\sigma_{\tau}^2 = 1 / q^2 \Pi_{эф}^2. \quad (22)$$

Эффективная полоса $\Pi_{эф}$ определяется исходя из значений в общем случае взаимосвязанных величин:

- полосы пропускания приемников двухпозиционной системы;
- времени накопления приходящих случайных процессов;
- времени корреляции флуктуаций случайного процесса $x(t)$, распространяющегося по ЛЭП.

В реальной обстановке наряду с волновыми процессами могут присутствовать множество мешающих, поэтому значения ρ_{12} могут оказаться существенно меньше единицы, что приведет к возрастанию σ_r . Обозначим дисперсии полезных и мешающих сигналов на выходах коррелятора $\sigma_{1,2}^2$ и $\sigma_{П1,2}^2$. Тогда ρ_{12}^2 , в соответствии с (19), определяется как

$$\rho_{12}^2 = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{(\sigma_1^2 + \sigma_{П1}^2)(\sigma_2^2 + \sigma_{П2}^2)} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{(1 + \gamma_1)(1 + \gamma_2)}, \quad (23)$$

где $\gamma_{1,2} = \sigma_{1,2}^2 / \sigma_{П1,2}^2$ – отношение сигнал-помеха по мощности на первом и втором входах коррелятора. Следует отметить, что произведение полосы обработки (полоса приемников) и длительности T_n

$$P \cdot T_n = f_{\delta} \cdot T_n / 2 = N / 2 \quad (24)$$

называют коэффициентом корреляционного накопления. Заметим, что межпунктовое запаздывание сигналов в канале и элементах аппаратуры обработки может быть учтено в соответствующих параметрах линии задержки (рис. 4.) и практически не влияет на значения результирующих точностных характеристик такого волнового метода ОМП.

В заключение следует отметить, что использование методов пассивной локации, основанных на межпунктовой корреляционной обработке сигналов [12], а не используемых ранее оценок их времени запаздывания [1 – 10], позволило:

- устранить необходимость точной синхронизации приемников волновых процессов на концах ЛЭП;
- получить алгоритмы обработки в условиях случайных искажений формы и «затягивания» входящих фронтов волновых процессов.

Приведенные рассуждения и локационные приемы [11, 12] могут быть распространены и на другие методы ОМП ЛЭП. Очевидно, что в сочетании с методами современной цифровой обработки сигналов и спектрального анализа возможно как усовершенствование имеющихся устройств ОМП, так и разработка новых.

Библиографический список

1. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г.М. Шалыт. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 312 с.
2. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами / Г.М. Шалыт. – М.: Энергия, 1968. – 215 с.

3. **Висящев, А.Н.** Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: учеб. пособие / А.Н. Висящев. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 146 с.
4. **Biskeborn, M.C.** Location of faults in electrical transmission systems. – Pat. US. 2.493.800, 10.01.1950.
5. **Weintraub, N.** Transient surge detector. – Pat. US. 2.717.992, 13.10.1955.
6. **Koji, O.** Trouble detection / location apparatus for uni-phase high voltage transmission line. – Pat. JP. 7043410, 14.02.1995.
7. **Bunch, R.H.** Fault finder. – Pat. US. 4.570.231, 11.02.1986.
8. **Toshiharu, M.** Apparatus for locating accident point of transmission line. – Pat. JP. 63206668, 25.08.1988.
9. **System** for detecting defective point on power transmission line by utilizing satellite / O. Masaaki, O. Sakari, T. Akira, Y. Masatoshi. – Pat. US. 5.070.573, 03.12.1991.
10. **System** for discriminating kinds of surges on power transmission line / O. Masaaki, O. Sakari. – Pat. US. 5.508.619, 16.04.1996.
11. **Ширман, Я.Д.** Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник; под ред. Я.Д. Ширмана / Я.Д. Ширман [и др.]. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
12. **Теоретические** основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.

УДК 621.316.925

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УЧАСТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ В СРЕДЕ MATLAB

В.А. Шуин, д-р техн. наук, С.Е. Бобров, асп.

Введение. Важным этапом при разработке алгоритмов функционирования устройств релейной защиты является исследование их работы с использованием математической модели электроэнергетической системы (ЭЭС). В последнее время появилось множество программ, позволяющих моделировать работу ЭЭС, задавая параметры сети. К ним относится интегрированная система моделирования MATLAB с приложением Simulink. Указанная система моделирования позволяет исследовать алгоритмы работы защит как в переходном, так и в установившемся режимах работы ЭЭС, а также сохранять данные переходного процесса, мгновенные отсчеты токов и напряжений с заданной частотой дискретизации для обработки в других программных средах.

Ниже исследуются алгоритмы функционирования основных функциональных узлов дифференциально-фазной защиты (ДФЗ), в частности алгоритмы работы органа манипуляции (ОМ) и органа сравнения фаз (ОСФ).

Исследование включает решение следующих задач:

- задание схемы и параметров элементов ЭЭС в среде MATLAB + Simulink;
- выбор режима работы сети (нормальный режим работы, режим короткого замыкания (КЗ));
- задание оптимального метода расчета для заданной ЭЭС;
- расчет и запись параметров переходного процесса;
- проверка работы алгоритма на основе полученных мгновенных значений токов в среде MatCAD;
- сравнение полученных результатов с требуемыми.

Модель ЭЭС для исследования алгоритмов функционирования ОМ и ОСФ. Исследование алгоритмов ОСФ и ОМ производится на простейшей модели ЭЭС, включающей две системы, параллельную линию электропередачи, силовой трансформатор и трансформаторы тока (ТТ) (рис. 1). Модель каждого из перечисленных элементов реализована в программной среде MATLAB + Simulink (рис. 2).

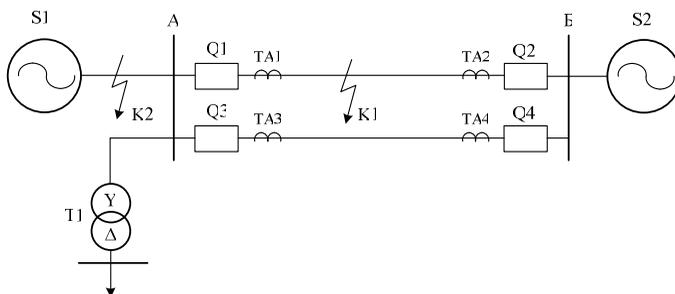


Рис. 1. Однолинейная схема модели ЭЭС

В модель ЭЭС не включены трансформаторы напряжения, поскольку для ОМ и ОСФ входной информационной величиной является ток защищаемой ЛЭП и информация о напряжении не требуется.

Согласно [1, 2], при исследовании алгоритмов работы ОМ и ОСФ должны рассматриваться следующие режимы работы ЭЭС: при действии внешнего КЗ, внутреннего КЗ, а также при последовательно возникающих внешних и внутренних КЗ. Рассматриваемые точки КЗ изображены на рис. 1.

*Исследование алгоритмов работы дифференциально-фазной
защиты линий электропередачи на математической модели
участка электрической сети в среде MATLAB*

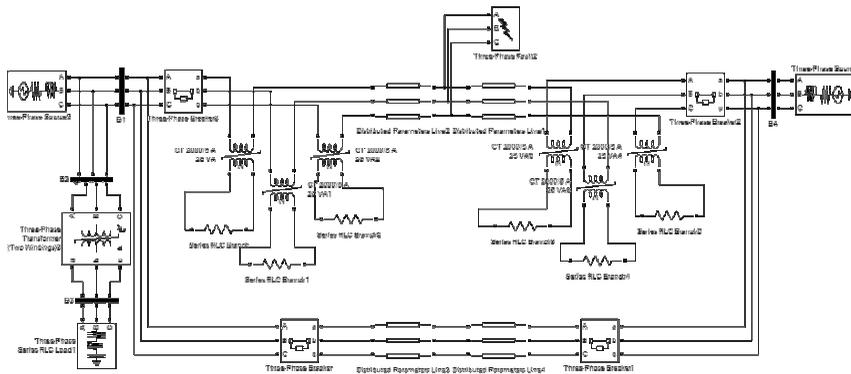


Рис. 2. Модель ЭЭС в среде MATLAB + Simulink

Расчет переходного процесса производится автоматически после задания метода расчета, шага интегрирования, времени расчета. Для рассматриваемой сети был выбран метод расчета дифференциальных уравнений с переменным шагом интегрирования [3].

Результат моделирования с помощью специальных функций сохраняется в виде массивов мгновенных значений, взятых с определенной частотой дискретизации. На рис. 3 приведена последовательность элементов, используемых для получения мгновенных значений токов с каждой из сторон моделируемой линии.

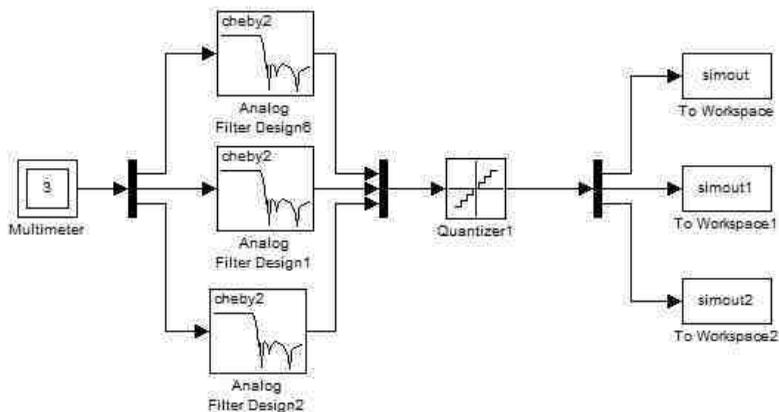


Рис. 3. Структура записи мгновенных значений токов по каждой фазе в массивы

В приведенную структуру входят следующие элементы: мультиметры, установленные в цепях вторичной нагрузки ТТ; низкочастотный аналоговый фильтр Чебышева второго порядка с частотой среза 600 Гц; элемент квантования с частотой дискретизации 4000 Гц; массивы для записи мгновенных значений токов по каждой фазе.

Аналоговый фильтр, используемый в рассматриваемой модели, заменяет подобный, устанавливаемый в микропроцессорных (МП) терминалах релейной защиты (РЗ). Элемент квантования заменяет аналого-цифровой преобразователь, входящий также в МП терминалы. Массивы мгновенных значений токов, полученные при расчете переходного процесса, записываются в отдельные файлы, которые в дальнейшем используются для проверки работы алгоритмов ОМ и ОСФ.

Временные диаграммы токов, полученные при расчете переходного процесса ЭЭС в случае внутреннего КЗ в точке К1 (рис. 1), приведены на рис. 4.

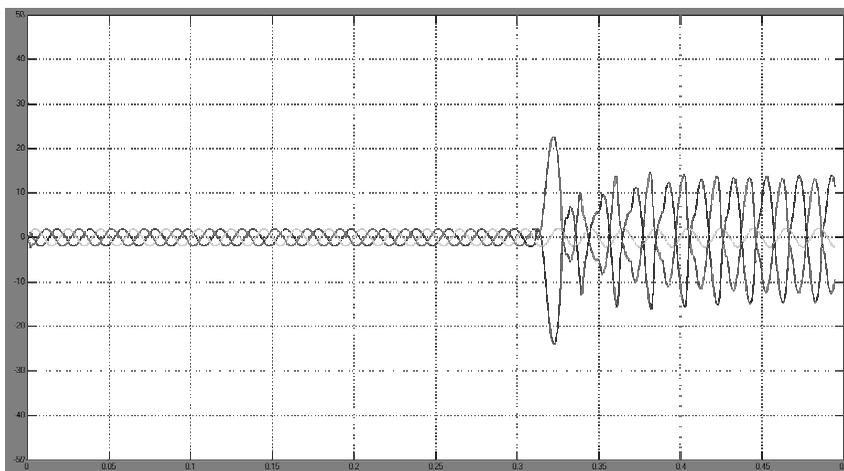


Рис. 4. Временные диаграммы токов со стороны подстанции А при двухфазном внутреннем КЗ в точке К1

На временных диаграммах отчетливо видна апериодическая составляющая, а также насыщение ТТ в фазах А и С, что подтверждает достоверность полученных результатов. Искажение синусоиды, вызванное указанными причинами, необходимо для проверки работы алгоритмов в условиях, приближенных к реальным.

Исследование алгоритма ОМ ДФЗ. Моделирование алгоритмов ОМ и ОСФ полностью в среде MATLAB не представляется возможным в связи с большой трудностью реализации, а также ограниченностью ресурсов системы моделирования MATLAB + Simulink. В связи с этим алгоритмы работы ОМ и ОСФ были смоделированы в среде MATCAD, которая обладает большей гибкостью по сравнению с системой моделирования MATLAB при решении подобных задач. Эти алгоритмы рассмотрены в [1, 2]. Поэтому ниже рассматриваются только ключевые моменты, связанные с оценкой эффективности работы алгоритмов ОМ и ОСФ.

Функция ОМ в дифференциально-фазной защите заключается в формировании манипулированного сигнала на основе мгновенных значений тока манипуляции. Расчет мгновенных значений тока манипуляции ведется на основе мгновенных значений тока прямой и обратной последовательностей по известному выражению. Однако для отстройки от апериодической составляющей и исключения влияния насыщения ТТ используется специальная обработка полученных мгновенных значений тока манипуляции. На рис. 5 приведены временные диаграммы тока манипуляции до и после обработки.

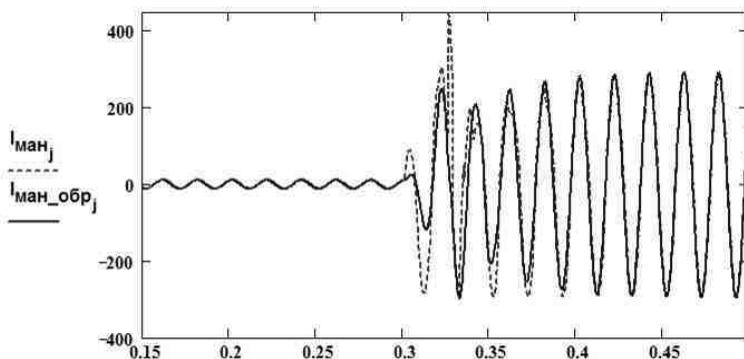


Рис. 5. Временные диаграммы тока манипуляции до и после обработки

Анализ временных диаграмм показывает, что токи совпадают в нормальном режиме работы ЭЭС и отличаются в переходном, где искаженная синусоида заменяется выделенной первой гармоникой. Полученный результат обработки с использованием косинусного фильтра оценивается визуально, по симметрии между полупериодами. В частности, во временной диаграмме необработанного тока манипуляции виден выброс тока, который сглаживается после обработки.

На основе мгновенных значений результирующего тока манипуляции формируется управляющий сигнал высокочастотного (ВЧ) передатчика. Однако для большей гибкости и лучшей приспособленности к совместной работе с ранее выпущенными устройствами ДФЗ была введена возможность сдвига выходного сигнала ОМ в сторону опережения или отставания. Если задача сдвига выходного сигнала в сторону отставания решается тривиально, то сдвиг в сторону опережения связан, прежде всего, с наиболее точным предположением о поведении тока манипуляции через заданное время опережения. Решение проблемы описывается в [1], где рассматриваются несколько подходов, а именно, три алгоритма смещения. Результат исследования приводится на рис. 6, на котором представлены временные диаграммы изменения угла блокировки при внешнем КЗ в случае сдвига выходного сигнала ОМ одной из сторон защищаемой линии на 72° в сторону опережения в целях компенсации фазового сдвига между токами манипуляции по концам линии. Рассмотрение именно внешнего КЗ связано с проверкой отсутствия излишних срабатываний ДФЗ.

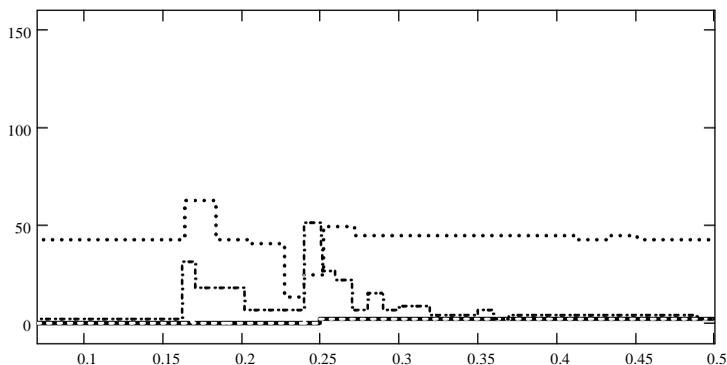


Рис. 6. Временные диаграммы изменения угла блокировки при использовании алгоритмов смещения при изначальном угле между токами манипуляции 72°

На рис. 6 сплошной линией показана временная диаграмма идеальных сигналов, без смещения; точечный сигнал получен на основании первого алгоритма смещения; пунктирный сигнал – на основании второго алгоритма; штрихпунктирный сигнал – на основании третьего алгоритма.

Исходя из полученных результатов, было принято решение об использовании алгоритма смещения, подразумевающего зеркальное отображение сигнала относительно линий, проведенных перпендикулярно оси времени через максимумы синусоиды.

Исследование алгоритма органа сравнения фаз дифференциально-фазной защиты. ОСФ предназначен для расчета угла блокировки в каждый период сравнения токов манипуляции. Поэтому оценка алгоритма проводится на основе расчетных сигналов токов манипуляции, полученных с каждой из сторон защищаемой линии при КЗ. Вследствие указанного, необходимо промоделировать работу ВЧ-приемников при заданном виде и месте КЗ, а также рассмотреть расчет угла блокировки на основании полученных ВЧ-приемниками сигналов. Для упрощения оценки допускается, что вид сигналов, полученных ВЧ-приемниками с каждой из сторон защищаемой линии, одинаковый.

Для проверки алгоритма работы ОСФ был выбран режим работы ЭЭС при последовательно происходящих внешних и внутренних КЗ. На рис. 7 показана временная диаграмма входного сигнала ОСФ (выходного сигнала ВЧ-приемника) для рассматриваемого вида повреждения.

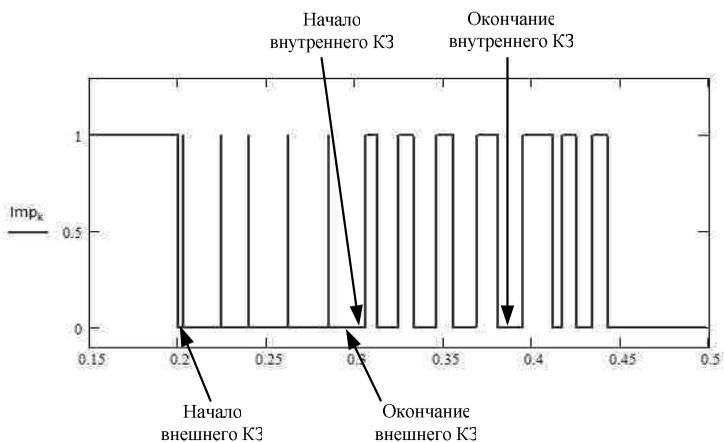


Рис. 7. Временная диаграмма входного сигнала ОСФ при переходе внешнего КЗ во внутреннее

Исходя из полученных результатов, была рассчитана временная диаграмма изменения угла блокировки, которая вычисляется по алгоритму ОСФ. На рис. 8 изображена временная диаграмма изменения угла блокировки при рассматриваемом виде повреждений, на которой показан сигнал срабатывания ОСФ.

Полученная временная диаграмма иллюстрирует корректную работу ОСФ при рассматриваемом виде повреждения. Задержка в срабатывании

ОСФ связана с отстройкой от режима реверса мощности, при котором, в связи с не идентичностью переходных процессов на концах защищаемой линии, возможно кратковременное срабатывание ОСФ.

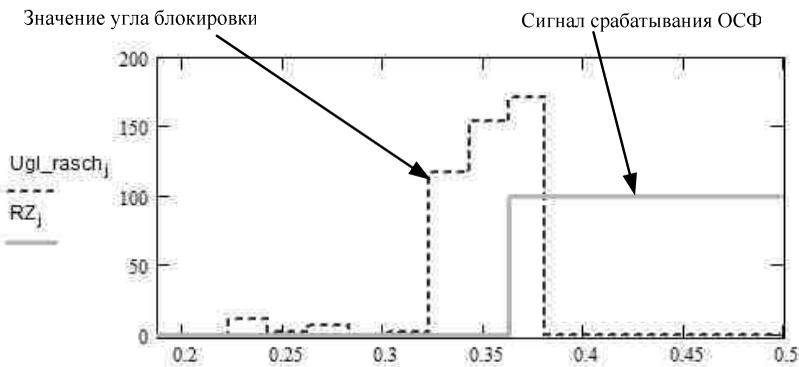


Рис. 8. Временные диаграммы изменения угла блокировки при переходе внешнего КЗ во внутреннее

Выводы

1. Предлагаемая методика исследования алгоритмов функционирования основных функциональных элементов ДФЗ позволяет наиболее точно оценить их работу в переходных и установившихся режимах работы ЭЭС.

2. На основании анализа мгновенных значений токов, полученных при расчете переходного процесса в ЭЭС в среде MATLAB + Simulink, в программе MATCAD произведена оценка эффективности алгоритмов работы ОМ и ОСФ.

Библиографический список

1. **Бобров, С.Е.** Алгоритм органа манипуляции дифференциально-фазной защиты на микропроцессорной элементной базе для линий напряжением 110 – 220 кВ / Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 6.
2. **Бобров, С.Е.** Разработка и исследование алгоритма работы органа сравнения фаз дифференциально-фазной защиты линий напряжением 110 – 220 кВ / Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 97 – 101.
3. **Дьяконов, В.П.** MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005.

УДК 621.316.925

О ПРИНЦИПАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ НА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ ДЛЯ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 – 220 кВ

С.Е. Бобров, асп.

Введение. В начале 80-х годов прошлого века на смену панели дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) для линий напряжением 110 – 220 кВ, выполненной на электромеханической элементной базе (ДФЗ-2, ДФЗ-201), отечественной промышленностью (ЧЭАЗ) был начат выпуск панели высокочастотной направленной защиты (ВЧНЗ) на интегральной микроэлектронной базе типа ПДЭ 2802. ВЧНЗ имеет некоторые принципиальные преимущества по сравнению с ДФЗ: значительно лучше приспособлена для работы на линиях с ответвлениями; может быть выполнена несколько более быстродействующей; предъявляет меньшие требования к ВЧ-каналу [1]. Однако ВЧНЗ имеет и недостатки, по сравнению с ДФЗ, главный из которых заключается в возможности отказов защиты при возникновении неисправностей в цепях трансформатора напряжения.

Появление микропроцессорных (МП) устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) характеризует начало нового этапа развития и совершенствования РЗА [2]. Общее число введенных в эксплуатацию МП устройств РЗА в России пока невелико, однако это только вопрос времени. В настоящее время практически все проекты новых и модернизируемых электроэнергетических объектов выполняются только с применением МП устройств РЗА.

Поэтому разработка МП ДФЗ для линий напряжением 110 – 220 кВ является актуальной задачей. В МП ДФЗ могут быть полностью учтены достоинства и исключены недостатки, указанные выше в отношении ВЧНЗ, а также внесены дополнительные изменения, обеспечивающие повышение эффективности и надежности функционирования ДФЗ. Ниже сформулированы основные, по нашему мнению, принципы выполнения современной МП ДФЗ для линий напряжением 110 – 220 кВ.

Принципы выполнения МП ДФЗ. К основным принципам, которые должны быть положены в основу МП ДФЗ, относятся следующие:

– МП ДФЗ должна иметь весь спектр токовых пусковых органов (ПО), реагирующих на фазные токи, их симметричные и аварийные составляющие, что обеспечивает повышение эффективности функционирования (отстроенности от внешних КЗ и режимов без КЗ и чувствительности при внутренних КЗ) при разных видах коротких замыканий в электрических сетях различной конфигурации [3];

– в МП ДФЗ должны быть предусмотрены дополнительные ПО (реле сопротивления, орган направления мощности нулевой последовательности), вводимые в работу только на линиях с ответвлениями, при этом должна предусматриваться возможность выбора дополнительных ПО из двух комбинаций, отличающихся чувствительностью к КЗ на защищаемой линии;

– в МП ДФЗ должна быть предусмотрена возможность введения блокировки токовых ПО при выявлении броска тока намагничивания силового трансформатора на ответвлении; указанная блокировка позволяет исключить (при выборе уставки) условие отстройки от броска тока намагничивания и обеспечить большую чувствительность к КЗ на защищаемой линии;

– в МП ДФЗ должны быть предусмотрено использование реле сопротивления совместно со специальным органом направления мощности для отстройки от внешних КЗ «за спиной», что позволяет исключить излишние срабатывания ДФЗ при указанных КЗ и увеличить чувствительность РС к КЗ на защищаемой линии за счет отсутствия необходимости учитывать при расчете уставок РС условие отстройки от КЗ в питающей системе;

– в МП ДФЗ должны быть приняты специальные меры, обеспечивающие устойчивость срабатываний при однофазном КЗ с обрывом той же фазы (при указанном виде КЗ возможны несрабатывания ДФЗ по принципу ее действия [5]);

– в МП ДФЗ должно быть предусмотрено использование интегрирующего принципа в алгоритме работы органа сравнения фаз (ОСФ), позволяющего обеспечить зависимость времени срабатывания ОСФ от измеренного угла блокировки и адаптировать работу защиты к величине угла блокировки; применение указанного принципа должно обеспечивать срабатывание ОСФ после одного периода сравнения при угле блокировки более 90° и срабатывание ОСФ после двух или трех подряд периодов сравнения при угле блокировки менее 90° ;

– в МП ДФЗ должны быть приняты меры, исключающие ложные срабатывания защиты при реверсе мощности, при котором возможно кратковременное срабатывание ОСФ;

– в МП ДФЗ должна быть обеспечена возможность работы со всеми применяемыми в эксплуатации высокочастотными (ВЧ) приемопередатчиками, предназначенными для работы совместно как с релейно-контактными защитами, так и защитами на микроэлектронной и микропроцессорной базе;

– в МП ДФЗ должна быть обеспечена выдача манипулированного сигнала при наименьшем токе манипуляции, в отличие от релейно-контактных ДФЗ, в которых порог выдачи манипулированного сигнала определяется значением порога манипуляции ВЧ-передатчика (т.е. зависит от аппаратных возможностей устройства ВЧ-аппаратуры);

– в МП ДФЗ должна быть предусмотрена корректировка начальной фазы тока манипуляции в положительную и отрицательную стороны, позволяющая синхронизировать работу двух полукомплектов при использовании в качестве одного из них разрабатываемого МП-устройства, в качестве другого – любого из существующих устройств ДФЗ;

– МП ДФЗ должна сохранять возможность полноценного функционирования устройства при потере цепей напряжения, что обеспечивается применением, прежде всего, токовых ПО;

– МП ДФЗ должна обеспечивать возможность автоматического измерения и компенсации задержки ВЧ-сигнала по каналу связи для повышения устойчивости функционирования;

– МП ДФЗ должна обеспечивать возможность использования на противоположных концах защищаемой линии полукомплектов ДФЗ различных производителей, включая исполнения защиты на другой элементной базе (например, электромеханические панели типа ДФЗ-2 и ДФЗ-201).

Выводы

1. Реализация рассмотренных выше принципов возможна только на микропроцессорной базе.

2. Указанные принципы позволяют реализовать современное устройство МП ДФЗ, адаптированное ко всем типам линий и обладающее более высоким техническим совершенством (селективностью и устойчивостью функционирования) по сравнению с существующими исполнениями ДФЗ.

Библиографический список

1. **Федосеев, А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А.М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

2. **Законьшек, Я.В.** И все-таки цифровая... Ч. 1. Новые возможности и характеристики / Я.В. Законьшек, Г.С. Нудельман // Релейщик. – 2009. – № 3. – С. 36 – 40.
3. **Концепция** построения дифференциально-фазной защиты ЛЭП / О.Н. Григорьев [и др.]. – Релейная защита и автоматика энергосистем 2002: сб. тез. докл. XV научн.-техн. конф. – М.: ЦДУ ЕЭС России, 2002. – С. 91 – 93.
4. **Руководящие** указания по релейной защите. Вып. 9. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110 – 330 кВ. – М.: Энергия, 1972.
5. **Атабеков, Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей / Г.И. Атабеков. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957.

УДК 621.316.925

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ОДНОФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ С ОБРЫВОМ ФАЗЫ

С.Е. Бобров, асп.

Одна из наиболее актуальных проблем при разработке дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) заключается в обеспечении правильной работы защиты при однофазном коротком замыкании (КЗ) с одновременным обрывом поврежденной фазы. Согласно [1], в случае внутреннего однофазного КЗ с обрывом поврежденной фазы при $z_1 < z_0$ и $z_2 < z_0$, где z_1 , z_2 , z_0 – сопротивления линии со стороны обрыва, токи манипуляции по концам защищаемой линии будут сдвинуты на 180 эл. град. Указанные угловые соотношения соответствуют внешнему КЗ, поэтому при рассматриваемом виде повреждения возможны отказы срабатывания ДФЗ по принципу ее действия.

Решением данной проблемы является воздействие на останов высокочастотного (ВЧ) передатчика со стороны обрыва. В этом случае произойдет отключение защищаемой линии, поскольку в высокочастотном канале связи появятся паузы, длительность которых превышает заданную уставку по углу блокировки. На рис. 1 представлена предложенная функционально-логическая схема для воздействия на останов ВЧ-передатчика при выявлении однофазного КЗ с обрывом поврежденной фазы.

Согласно схеме (рис. 1), сигнал на останов ВЧ-передатчика формируется только при выявлении факта отсутствия срабатывания ОСФ. Указанное позволяет надежно отстроиться от всех внутренних КЗ, при кото-

рых токи манипуляции по концам защищаемой линии совпадают по фазе, а также обеспечить правильную работу при неполнофазном режиме в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Поэтому в область рассмотрения попадают все внешние КЗ, а также рассматриваемый вид повреждения, при которых токи манипуляции находятся в противофазе. Помимо этого, использование в схеме разрешающего органа направления мощности нулевой последовательности (ОНМ НП-р) позволяет надежно отстроиться от аналогичных повреждений «за спиной». На основании указанного, цель проведенного исследования сводится к отделению в полукомплексе, установленном со стороны обрыва, внутреннего однофазного КЗ с обрывом поврежденной фазы от любых видов внешних КЗ, возникающих на смежной линии.

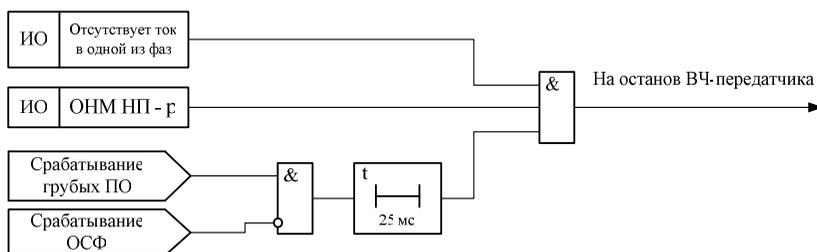


Рис. 1. Функционально-логическая схема останова ВЧ-передатчика при выявлении однофазного КЗ с обрывом поврежденной фазы

Известные алгоритмы определения вида повреждения не позволяют квалифицировать обрыв провода, поскольку соотношения между симметричными составляющими в месте обрыва схожи с аналогичными при двухфазном КЗ на землю. Указанное подтверждается материалами [2], а именно, граничные условия при обрыве фазы А следующие: $I_{LA} = I_{L1} + I_{L2} + I_{L0}$; $U_{LB} = U_{LC} = 0$. Кроме этого, соотношения между фазными токами как по величинам, так и по углам в неповрежденных фазах при указанных повреждениях могут быть одинаковы.

Для разрешения поставленного вопроса предложено использовать дополнительный измерительный орган, квалифицирующий обрыв провода на защищаемой линии.

Одно из граничных условий при обрыве фазы А (В или С) представляется выражением $I_{LA(B,C)} = 0$. Из этого следует, что обрыв фазы можно квалифицировать по отсутствию тока в одной из фаз. Однако, полуккомплекты защит установлены по концам защищаемой линии, поэтому при

обрыве, возникающем на противоположном конце линии относительно рассматриваемого полукompлекта, вторичный ток трансформатора тока, установленного в поврежденной фазе, будет определяться емкостным током линии (для линии с двухсторонним питанием без отпаяк). Причем емкостный ток, в зависимости от места повреждения, изменяется от 0 до $I_{уд.EMK} \cdot l_K$, где $I_{уд.EMK}$ – удельный емкостный ток на 1 км защищаемой линии; l_K – длина защищаемой линии. Уставка по току измерительного органа (ИО), квалифицирующего обрыв фазного провода, рассчитывается по следующему выражению:

$$I_{уст} \geq K_{отс} \cdot I_{уд.EMK} \cdot l_K, \quad (1)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимается равным 1,05.

Неравенство, согласно которому срабатывает ИО, квалифицирующий обрыв фазного провода, записывается следующим образом:

$$I_{\phi} < I_{уст}. \quad (2)$$

Проверка отсутствия тока осуществляется для каждой фазы по выражению (2). Результаты сравнения фазных токов с уставкой, рассчитанной по выражению (1), объединяются по схеме «ИЛИ».

При наличии отпаяк на защищаемой линии использование специального алгоритма для обеспечения работы при однофазном КЗ с обрывом фазы определяется расчетом. В случае, если это необходимо при расчете уставки по выражению (1) следует учесть ток отпайки.

За счет использования в расчете уставки ИО по току по выражению (1) коэффициента отстройки, значение которого превышает 1, область срабатывания рассматриваемого ИО распространяется на начало смежной линии. Для исключения ложной работы защиты при всех видах повреждений на смежной линии, удовлетворяющих выражению (2), предложено ввести в функционально-логическую схему ДФЗ дополнительный блок, формирующий непрерывный сигнал при выявлении указанного повреждения на смежной линии. Функционально-логическая схема дополнительного блока представлена на рис. 2.

В функционально-логической схеме блока, формирующего непрерывный ВЧ-сигнал, используются блокирующий орган направления мощности нулевой последовательности (ОНМ НП-б), срабатывающий при внешних КЗ «за спиной», сигнал срабатывания чувствительных пусковых органов и сигнал срабатывания измерительного органа, выявляющего обрыв фазного провода.

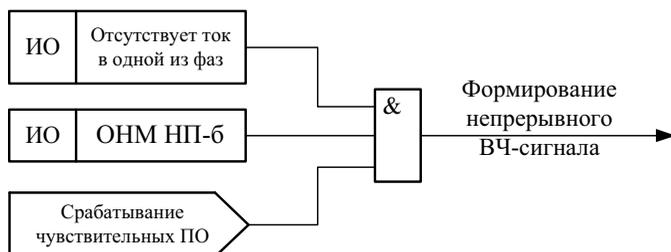


Рис. 2. Функционально-логическая схема блока, формирующего непрерывный ВЧ-сигнал при обнаружении обрыва «за спиной»

Оценка работы защиты с дополнительными функциональными блоками была произведена при следующем сочетании повреждений:

- однофазное КЗ на защищаемой линии и обрыв той же фазы на смежной линии;
- обрыв фазы на защищаемой линии и однофазное КЗ на той же фазе смежной линии.

Согласно [3], в случае обрыва фазного провода на защищаемой линии и однофазного КЗ в той же фазе на смежной линии ОСФ срабатывать не будет. Работа ОНМ НП в этом случае зависит от параметров ЭЭС, места повреждения. Таким образом, при срабатывании ОНМ НП-р на обоих концах защищаемой линии будет срабатывать схема рис. 1, воздействуя на останов ВЧ-передатчика, при срабатывании ОНМ НП-б будет формироваться непрерывный сигнал от дополнительного блока, блокируя работу защиты.

При однофазном КЗ на защищаемой линии и обрыве провода той же фазы смежной линии ОСФ будет четко работать, но непрерывный ВЧ-сигнал, сформированный дополнительной схемой, представленной на рис. 2, из-за отсутствия тока в одной из фаз и срабатывания ОНМ НП-б вызовет блокировку ОСФ, что является неприемлемым. На основании этого данная функционально-логическая схема была дополнена сигналом отсутствия срабатывания ОСФ. Измененная схема представлена на рис. 3.

При исследовании работы защиты в режиме однофазного КЗ с обрывом фазы выяснилось, что имеются случаи, при которых возможно отсутствие тока в двух фазах со стороны обрыва. На основании указанного и руководствуясь граничными условиями при однофазном КЗ в месте КЗ и первым законом Кирхгофа, можно сделать следующие выводы:

- при КЗ фазы А токи в месте КЗ в двух других фазах отсутствуют: $I_{Bк} = I_{Cк} = 0$;

– согласно первому закону Кирхгофа, $I_{Bk} = I_{B1} + I_{B2}$. При равенстве нулю тока фазы В в месте КЗ (I_{Bk}) и со стороны обрыва (I_{B2}) ток в фазе В со стороны КЗ также будет равен нулю.

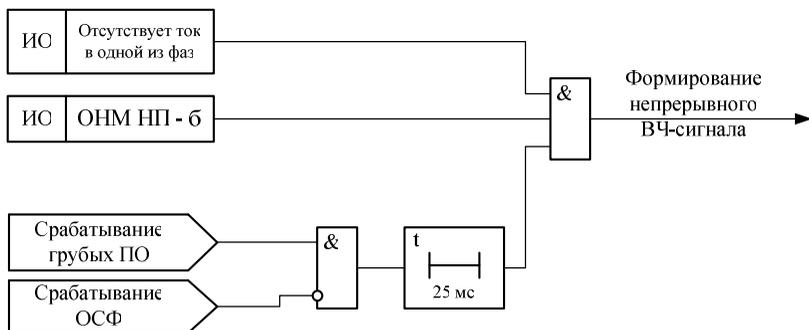


Рис. 3. Скорректированная функционально-логическая схема блока, формирующего непрерывный ВЧ-сигнал

Функционально-логическая схема, показанная на рис. 1, не обеспечивает правильную работу защиты при рассматриваемом виде повреждения, поскольку в случае отсутствия тока в двух фазах со стороны обрыва и, следовательно, в одной фазе со стороны КЗ, сформируется сигнал останова ВЧ-передатчика с обеих сторон. Для предотвращения некорректной работы схемы в указанном случае схема, представленная на рис. 1, преобразована к виду, показанному на рис. 4.

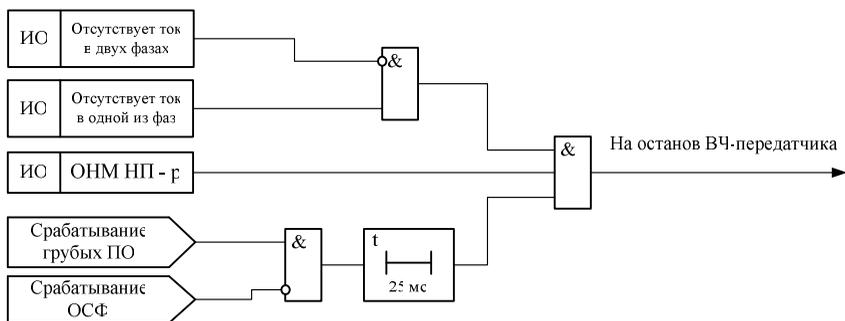


Рис. 4. Функционально-логическая схема останова ВЧ-передатчика, преобразованная для предотвращения некорректной работы

Рассмотрим вариант, при котором отсутствуют токи в двух неповрежденных фазах со стороны однофазного КЗ при однофазном КЗ с обрывом на защищаемой линии. В этом случае токи симметричных составляющих со стороны однофазного КЗ выражаются следующей зависимостью:

$$I_{1L} = I_{2L} = I_{0L}, \quad (3)$$

где I_{1L} , I_{2L} , I_{0L} – токи прямой, обратной и нулевой последовательности со стороны однофазного КЗ соответственно.

Исходя из равенства (3) и граничного условия по токам в месте однофазного КЗ, идентичного равенству (3), при рассматриваемом распределении токов со стороны однофазного КЗ зависимость между токами прямой, обратной и нулевой последовательности со стороны обрыва выражается следующим равенством:

$$I_{1Y} = I_{2Y} = I_{0Y}, \quad (4)$$

где I_{1Y} , I_{2Y} , I_{0Y} – токи прямой, обратной и нулевой последовательности со стороны обрыва соответственно.

Но граничное условие для приведенных токов в месте обрыва записывается следующим образом:

$$I_{1Y} + I_{2Y} + I_{0Y} = 0. \quad (5)$$

Приведенное равенство противоречит равенству (4), поэтому случай, когда отсутствуют токи в двух неповрежденных фазах при однофазном КЗ с обрывом со стороны однофазного КЗ, не учитывается.

Выводы

1. Использование в функционально-логической схеме ДФЗ блокирующего и разрешающего органа направления мощности нулевой последовательности позволяет обеспечить правильную работу ДФЗ при однофазном КЗ с обрывом поврежденной фазы. Квалификация обрыва производится с применением дополнительного измерительного органа по отсутствию тока в одной из фаз.

2. Исключение останова ВЧ-передатчика с одной из сторон при существовании продольной несимметрии, например, в цикле ОАПВ, может быть обеспечено за счет использования контролирующего сигнала, формируемого при срабатывании ОСФ и грубых пусковых органов.

3. Исследование работы защиты при дополнении функциональной схемы ДФЗ предложенными функциональными блоками показало, что защита обеспечивает отключение всех внутренних КЗ, в том числе однофазного КЗ с обрывом поврежденной фазы.

Библиографический список

1. **Атабеков, Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей / Г.И. Атабеков. – М.:Л.: Госэнергоиздат, 1957.
2. **Федосеев, А.М.** Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов / А.М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. **Чернина, А.Б.** Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах / А.Б. Чернина. – М.: ГЭИ, 1963.

УДК 621.316.925

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 6 – 10 кВ
НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ
ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ**

В.А. Шуин, д-р техн. наук, О.А. Сарбеева, Е.С. Чугрова, магистранты

Введение. Кабельные и воздушные линии напряжением сети 6 – 10 кВ составляют основу распределительных электрических сетей среднего напряжения и по данным ОАО «ФСК ЕЭС» имеют протяженность более 1 млн км. Большая часть этих линий выработала свой ресурс, что приводит к увеличению числа отключений (в год на 100 км) и к снижению надежности электроснабжения потребителей.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в электрических распределительных сетях напряжением 6 – 10 кВ (75 – 90 % от общего числа электрических повреждений) и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Главными причинами аварий, возникающих вследствие ОЗЗ в электрических сетях 6 – 10 кВ, в большинстве случаев являются переходы последних в двойные и множественные замыкания из-за перенапряжений на неповрежденных фазах при дуговом прерывистом характере повреждения.

Режим заземления нейтрали в значительной мере определяет характер электромагнитных переходных процессов при пробое изоляции фазы сети на землю и гашении заземляющей дуги, вероятность возникновения и величину перенапряжений при дуговых прерывистых повреждениях. Поэтому надежность электроснабжения потребителей в значительной мере зависит от эффективности режима заземления нейтрали электрических сетей 6 – 10 кВ в части ограничения перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ, а также от технического совершенства защит от этого вида повреждений.

В качестве защиты от ОЗЗ в сетях 6 – 10 кВ, как правило, применяются токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП), основанные на использовании составляющих промышленной частоты и действующие на сигнал или на отключение. Существенное влияние на эффективность функционирования ТЗНП оказывают электромагнитные переходные процессы, возникающие при дуговых прерывистых ОЗЗ.

По применяемой в настоящее время методике проектирования влияние токов электромагнитных переходных процессов при дуговых прерывистых ОЗЗ на функционирование ТЗНП учитывается при выборе тока срабатывания $I_{0\text{ с.з}}$. Основным расчетным условием для выбора $I_{0\text{ с.з}}$ в электрических сетях 6 – 10 кВ независимо от режима заземления их нейтрали (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), заземление нейтрали через резистор) является условие отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения при внешних (вне зоны действия) повреждениях:

$$I_{0\text{ с.з}} \geq K_{\text{отс}} K_{\text{неп}} I_{C\text{ собс}} , \quad (1)$$

где $K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки; $I_{C\text{ собс}}$ – собственный емкостный ток ОЗЗ защищаемого присоединения; $K_{\text{неп}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение значения тока в неповрежденном присоединении за счет свободных составляющих переходного процесса при дуговых прерывистых ОЗЗ.

В электрических сетях 6 – 10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, для ТЗНП с измерительными органами тока (ИОТ), выполненными на электромеханической элементной базе (например, реле тока типа ЭТ-521, ЭТД-561, РТ-40), значение $K_{\text{неп}}$ рекомендуется принимать равным 4,0 – 5,0 [1]. Для ТЗНП с ИОТ, выполненными на микроэлектронной и микропроцессорной базе, значения $K_{\text{неп}}$ приближенно принимают равными 2,0 – 3,0 [2 – 4 и др.]. Для сетей 6 – 10 кВ, работающих с резонансным заземлением нейтрали через ДГР или с высокоомным за-

землением нейтрали через резистор, значения K_{nep} , как правило, принимают такими же, как и для сетей с изолированной нейтралью.

Эффективность срабатываний ТЗНП в электрических сетях 6 – 10 кВ с изолированной нейтралью при внутренних ОЗЗ оценивается коэффициентом чувствительности при устойчивых металлических повреждениях:

$$K_{\check{ч}} = \frac{I_{C\Sigma} - I_{C\text{собоc}}}{I_{0\text{с.з}}} = \frac{I_{C\Sigma} - I_{C\text{собоc}}}{K_{\text{отс}} K_{nep} I_{C\text{собоc}}} \geq K_{\check{ч}.\text{мин}}, \quad (2)$$

где $I_{C\Sigma}$ – суммарный емкостный ток сети; $K_{\text{отс}} = 1,2$ – коэффициент отстройки; $K_{\check{ч}.\text{мин}}$ – минимально допустимое значение коэффициента чувствительности (1,2 – для защиты с действием на сигнал и 1,5 – для защиты с действием на отключение, для ТЗНП электродвигателей рекомендуется принимать $K_{\check{ч}.\text{мин}} = 2$ [3]).

Из (1) и (2) можно получить условие применимости ТЗНП в сетях с изолированной нейтралью

$$\frac{I_{C\text{собоc}}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + K_{\text{отс}} K_{nep} K_{\check{ч}.\text{мин}}}. \quad (3)$$

Для электрической сети, работающей с высокоомным заземлением нейтрали через резистор, при сопротивлении заземляющего резистора $R_N \approx X_{C\Sigma} = 1/3\omega C_{0\Sigma}$ условия применимости ТЗНП имеют вид

$$\frac{I_{C\text{собоc}}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{(K_{\text{отс}} K_{nep} K_{\check{ч}.\text{мин}})^2}{2}}}. \quad (4)$$

Чувствительность ТЗНП в сетях, работающих с компенсацией емкостных токов, определяется остаточным током ОЗЗ $I_{3.\text{ост}}^{(1)}$, содержащим при резонансной настройке ДГР только некомпенсируемые активную составляющую $I_{a\Sigma}$ и высшие гармоники $I_{\text{в.г}}$:

$$K_{\check{ч}} \approx \frac{I_{3.\text{ост}}^{(1)}}{I_{0\text{с.з}}} = \frac{I_{3.\text{ост}}^{(1)}}{K_{\text{отс}} K_{nep} I_{C\text{собоc}}} \approx \frac{\sqrt{I_{a\Sigma}^2 + I_{\text{в.г}}^2}}{K_{\text{отс}} K_{nep} I_{C\text{собоc}}} \geq K_{\check{ч}.\text{мин}}. \quad (5)$$

В компенсированных сетях значение остаточного тока ОЗЗ $I_{з.ост}^{(1)}$ находится обычно в пределах $(0,05 - 0,1)I_{C\Sigma}$, поэтому требуемую чувствительность ТЗНП практически можно обеспечить только на присоединениях с небольшими значениями собственного емкостного тока $I_{C\text{собс}}$ (например, на присоединениях секций собственных нужд электростанций, питаемых с шин ГРУ, распределительных подстанций (РП) систем электроснабжения предприятий и т.п.).

Из (2) – (5) следует, что при больших значениях коэффициента $K_{неп}$ чувствительность защиты и область ее применения в сетях с любым режимом заземления нейтрали значительно уменьшаются.

Приведенные выше рекомендации по выбору расчетного значения коэффициента $K_{неп}$ относятся прежде всего к электрическим сетям 6 – 10 кВ, работающим с изолированной нейтралью, и не учитывают различия в характере протекания переходных процессов в электрических сетях 6 – 10 кВ, работающих с другим режимом заземления нейтрали. Поэтому уточнение методики выбора тока срабатывания (т.е. значений $K_{неп}$ в (1)) в целях повышения эффективности функционирования различных исполнений ТЗНП в электрических сетях 6 – 10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, с высокоомным заземлением нейтрали через резистор или с резонансным заземлением нейтрали через ДГР, представляет собой практически важную задачу, связанную с повышением надежности электроснабжения потребителей.

Особенности переходных процессов при дуговых прерывистых ОЗЗ в электрических сетях 6 – 10 кВ, работающих с различными режимами заземления нейтрали. При существующих в настоящее время в России уровне технического совершенства средств автоматизации и степени резервирования электрических сетей 6 – 10 кВ и технологических процессов потребителей более высокую надежность электроснабжения, как правило, обеспечивают режимы заземления нейтрали, допускающие работу сети с ОЗЗ в течение ограниченного времени и не требующие мгновенного отключения поврежденного присоединения, прежде всего линий, от защиты. К таким режимам заземления нейтрали относятся названные выше:

- изолированная нейтраль (при ограниченных значениях суммарного емкостного тока сети [5]);
- резонансное заземление нейтрали через ДГР;

– высокоомное заземление нейтрали через резистор (при ограниченных значениях полного активно-емкостного тока ОЗЗ).

В сетях с указанными режимами заземления нейтрали большая часть ОЗЗ, прежде всего в начальной стадии развития повреждения, имеет неустойчивый дуговой прерывистый характер [7 – 9 и др.].

Существует несколько моделей (теорий) возникновения и развития перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ [7, 10, 11 и др.]: Петерсена (W. Petersen), Петерса и Слепяна (J. Peters и J. Slepian) и Н.Н. Белякова. На устойчивость несрабатываний ТЗНП при внешних ОЗЗ наибольшее влияние может оказывать дуговое прерывистое ОЗЗ по модели Петерсена, при котором процессы зажигания и гашения заземляющей дуги в предельном случае могут повторяться каждый полупериод промышленной частоты. В сетях, работающих с изолированной нейтралью, напряжение на поврежденной фазе при повторных пробоях может возрастать, при этом будет возрастать и значение переходного тока (амплитудное, действующее). Заземление нейтрали сети через высокоомный резистор или через ДГР ограничивает рост напряжения на поврежденной фазе при повторных пробоях, за счет чего уменьшаются значения как перенапряжений на неповрежденных фазах, так и переходных токов. При высокоомном заземлении нейтрали сети через резистор повторные пробои, как и в сети с изолированной нейтралью, в предельном случае возможны каждый полупериод промышленной частоты. При резонансном заземлении нейтрали сети через ДГР повторные пробои возникают, как правило, через 5 – 10 периодов промышленной частоты [7, 12]. Указанные особенности переходных токов при дуговых прерывистых ОЗЗ в электрических сетях, работающих с различными режимами заземления нейтрали, отражены на рис. 1.

Анализ осциллограмм (рис. 1) показывает, что электромагнитные переходные процессы при дуговых прерывистых ОЗЗ в электрических сетях, работающих с высокоомным заземлением нейтрали через резистор, будут оказывать существенно меньшее влияние на функционирование ТЗНП, а в сетях с резонансным заземлением нейтрали через ДГР – меньшее влияние, чем в сетях с резистивным заземлением нейтрали. Однако в существующей методике выбора параметров срабатывания ТЗНП эти особенности переходных процессов при дуговых прерывистых ОЗЗ в электрических сетях 6 – 10 кВ с различными режимами заземления нейтрали не учитываются.

*Влияние режима заземления нейтрали электрической сети 6 – 10 кВ
на функционирование токовых защит от однофазных замыканий на землю*

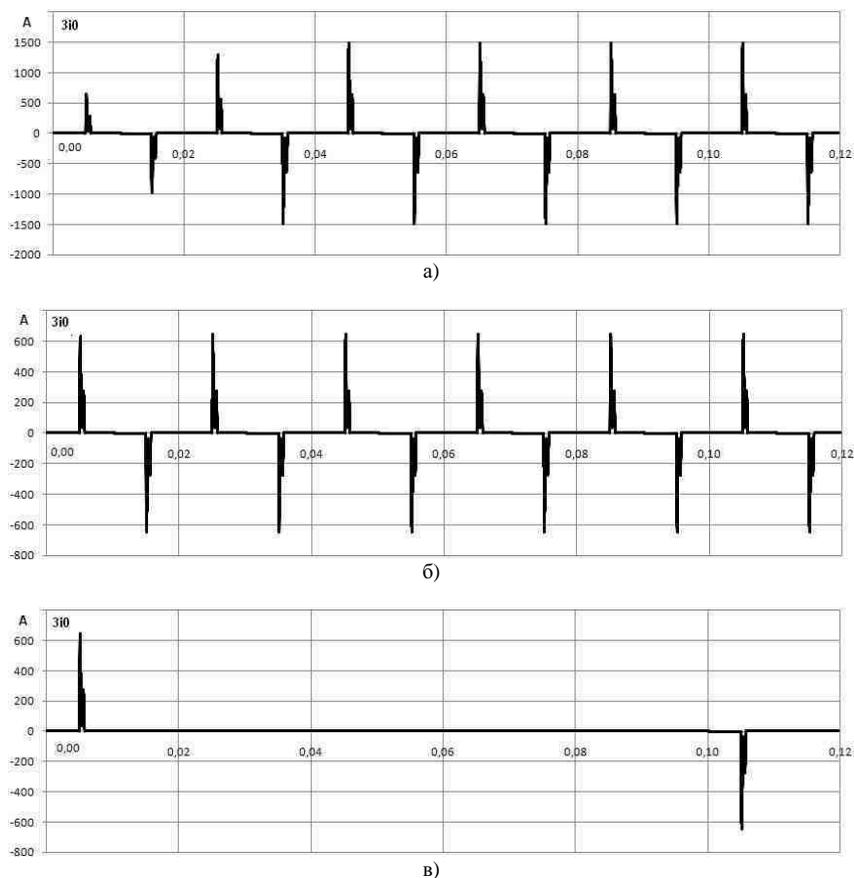


Рис. 1. Осциллограммы переходных токов в месте ОЗЗ при дуговом прерывистом ОЗЗ по модели Петерсена, полученные на математической модели сети 6 кВ при различных режимах заземления нейтрали: а – изолированная нейтраль; б – высокоомное заземление нейтрали через резистор; в – резонансное заземление нейтрали через ДГР

Метод исследований. Для исследования динамических режимов функционирования устройств релейной защиты обычно применяется математическое или физическое имитационное моделирование. Математическое моделирование эффективно при исследовании переходных процессов в электроэнергетических объектах и системах (ЭЭО и ЭЭС), однако возможности его применения для анализа динамических режимов

функционирования устройств релейной защиты (УРЗ) ограничены из-за трудностей или невозможности создания достаточно точных математических моделей последних. Для УРЗ, выполненных на микропроцессорной базе, создание математических моделей функций защиты, имитирующих их функционирование в условиях влияния электромагнитных переходных процессов, как правило, невозможно вообще, так как методы и алгоритмы формирования и обработки входных информационных и логических величин таких устройств являются коммерческой тайной фирм-производителей. Поэтому при исследовании динамических режимов функционирования УРЗ, выполненных на различной элементной базе, более эффективен метод физического моделирования, при котором на входы реального исполнения устройства защиты подаются токи и напряжения, сформированные на физической модели исследуемого ЭЭО.

В качестве физической модели исследуемых ЭЭО во многих случаях можно использовать программно-технические измерительные комплексы серии РЕТОМ (или их аналоги), предназначенные для проверки характеристик и параметров настройки УРЗ, а также анализа их работы в режимах реальных повреждений. Для исследования влияния электромагнитных переходных процессов на функционирование УРЗ можно использовать предусмотренную в устройствах серии РЕТОМ возможность воспроизведения любого электромагнитного процесса, записанного в COMTRADE-формате, и фиксации реакции УРЗ на приложенное воздействие. Однако возможности устройств серии РЕТОМ не всегда позволяют получить тестовые сигналы, соответствующие реальным токам и напряжениям переходного процесса при повреждениях в сложных ЭЭО.

Для формирования подобных тестовых сигналов целесообразно использовать математическое моделирование сложного ЭЭО, например, с использованием интегрированной системы моделирования Matlab с пакетом расширения Simulink, с последующим преобразованием специальной программой полученных на модели токов и напряжений в COMTRADE-формат.

С учетом изложенного, для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП при дуговых прерывистых ОЗЗ в электрических сетях 6 – 10 кВ наиболее эффективно применение метода имитационного физико-математического моделирования с применением программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ (рис. 2). Тестовые сигналы для испытаний различных исполнений ТЗНП были получены на математической модели электрической сети 6 – 10 кВ, выполненной с использованием интегрированной системы моделирования Matlab с пакетом расширения Simulink. Полученные на математической модели электриче-

ской сети тестовые сигналы – токи $3i_0$ при дугowych перемежающихся ОЗЗ – с помощью специальной программы преобразовывались в осциллограммы в COMTRADE-формате.

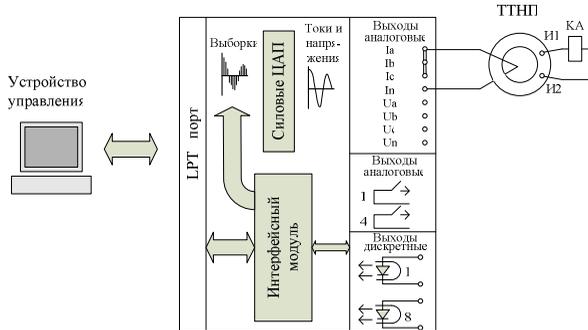


Рис. 2. Структурная схема системы для физико-математического моделирования динамических режимов функционирования ТЗНП

Математическая модель электрической сети среднего напряжения для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП. Математическая модель электрической сети 6 – 10 кВ для условий несрабатываний ТЗНП при внешних дугowych прерывистых ОЗЗ, реализованная с использованием системы моделирования Matlab и пакета расширения Simulink, приведена на рис. 3.

Трехфазная модель сети включает:

- 1) генерирующий источник питания;
- 2) линию электропередачи Line1 с распределенными параметрами;
- 3) коммутационную аппаратуру – выключатели и ключ ОЗЗ, имитирующий ОЗЗ в заданной точке электрической сети;
- 4) виртуальные измерители тока и напряжения, имитирующие трансформаторы тока напряжения, многоканальные осциллографы. При необходимости к любой точке сети можно подключить и другие виртуальные приборы.

Источник питания в схеме представлен фазными ЭДС E_a, E_b, E_c , индуктивностями L_c и активными сопротивлениями R_c в каждой фазе. Каждая фазная ЭДС представляет собой сумму основной гармонической составляющей (50 Гц) и высших гармоник до 15-й (и выше). Для моделирования сети с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор или через резистор в нейтраль генерирующего источника включена параллельная RL цепь, моделирующая дугогасящий реактор с параметрами $R_{ДГР}$ и $L_{ДГР}$.

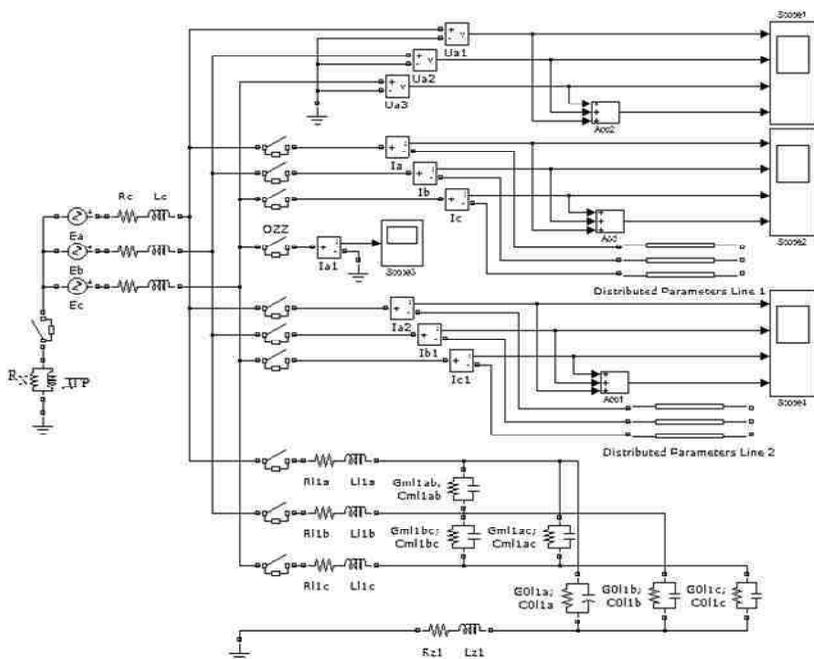


Рис. 3. Схема модели электрической сети 6 – 10 кВ для исследования условий устойчивости функционирования ТЗНП при дугowych прерывистых ОЗЗ

Конфигурация сети, режим заземления нейтрали, параметры элементов, положение точки и вид повреждения могут изменяться в зависимости от целей и задач исследований, а также особенностей принципа действия и (или) алгоритма функционирования исследуемого ТЗНП.

Тестовые сигналы для исследования динамических режимов функционирования различных исполнений ТЗНП. С учетом поставленной задачи под тестовым сигналом понимается ток $3i_0$ в неповрежденном присоединении при внешнем дуговом перемежающемся ОЗЗ, полученный для наиболее тяжелых (с точки зрения отстроенности ТЗНП от внешних повреждений) расчетных условий. Предварительный анализ показал, что переходный ток в неповрежденном присоединении достигает максимального значения при ОЗЗ на шинах и минимальной суммарной емкости остальной части сети. Расчетные условия: место возникновения ОЗЗ в сети, частота и условия возникновения повторных пробоев изоляции и гашения дуги тока ОЗЗ, параметры сети и неповрежденного при-

соединения и др., – зависят также от особенностей конкретного исполнения ТЗНП, определяемых элементной базой, принципом действия (алгоритмом функционирования) защиты, диапазоном изменения уставок по току срабатывания. Поэтому для различных исполнений ТЗНП в общем случае необходимы различные тестовые сигналы.

При исследованиях отстроенности от внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ различных исполнений ТЗНП были приняты следующие расчетные условия:

- электрическая сеть 6 – 10 кВ содержит только кабельные линии (волновые сопротивления кабельных линий (КЛ) значительно меньше волновых сопротивлений воздушных линий (ВЛ), поэтому амплитуды бросков переходного тока при дуговых перемежающихся ОЗЗ в кабельных сетях больше);

- суммарный емкостный ток сети $I_{\Sigma} \leq 20$ А при номинальном напряжении сети $U_{ном} = 10$ кВ и $I_{\Sigma} \leq 30$ А при $U_{ном} = 6$ кВ [4];

- максимальная длина КЛ не превышает 6 – 8 км (по условиям допустимой потери напряжения) при сечении жил 120 – 240 мм²;

- ОЗЗ металлическое (переходное сопротивление в месте повреждения равно нулю) на шинах защищаемого объекта;

- время затухания свободных составляющих в токах переходного процесса при ОЗЗ 3 – 5 мс [1 – 3 и др.];

- дуговое перемежающееся ОЗЗ имеет характер, соответствующий модели Петерсена или модели Петерса и Слепяна (рис. 4);

- при ОЗЗ по модели Петерсена гашение дуги происходит не при первом, а при последнем переходе через нуль среднечастотной (зарядной) составляющей тока переходного процесса;

- в ТЗНП используется наиболее распространенный тип трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) ТЗЛМ с неразъемным сердечником (близкие характеристики имеют ТТНП типа ТЗ и ТЗЛ).

Для приведенных основных расчетных условий на математической модели сети (рис. 3) получены тестовые сигналы для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП, выполненной с применением наиболее часто используемых в качестве ИОТ типов реле: электромагнитных реле типа РТ-40/0,2 и РТ-40/0,6, электронного реле типа РТЗ-50, микроэлектронного реле РТЗ-51. Полученные методом математического моделирования тестовые сигналы преобразовывались в тестовые сигналы в COMTRADE-формате.

С использованием полученных тестовых сигналов на устройстве РЕТОМ-51 проведены исследования динамических режимов функционирования ТЗНП с измерительными органами на электромеханической,

микроэлектронной и микропроцессорной базе и определены минимальные значения $K_{пер}$, обеспечивающие устойчивость несрабатываний различных исполнений ТЗНП при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ.

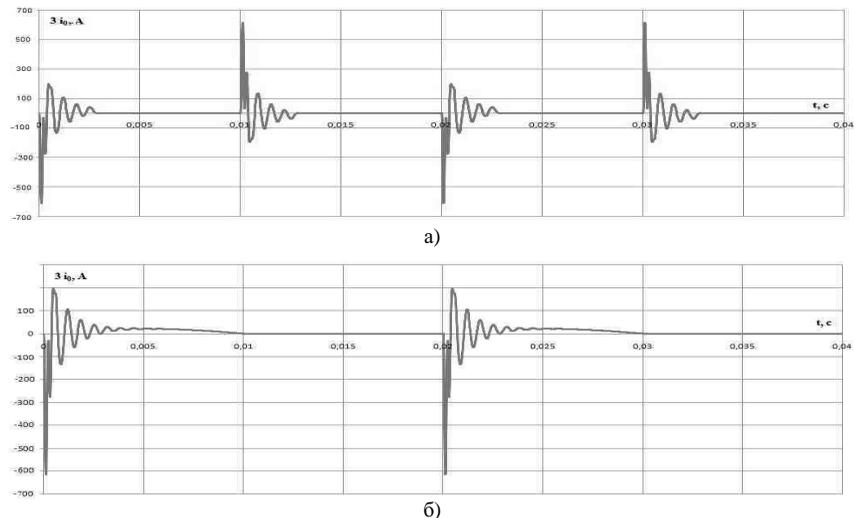


Рис. 4. Формы тестовых сигналов для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП: а – дуговое перемежающееся ОЗЗ по модели Петерсена; б – дуговое перемежающееся ОЗЗ по модели Петерса и Слепяна

Разработанная методика и банк тестовых сигналов могут быть использованы также для обоснования оптимального (по условиям устойчивости функционирования) алгоритма обработки входных токов нулевой последовательности в микропроцессорных ТЗНП.

Методика исследований динамических режимов работы различных исполнений ТЗНП. Для определения минимальных значений коэффициента $K_{пер}$, обеспечивающих устойчивость несрабатываний ТЗНП при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ, по выражению (1) при $K_{пер} = 1$ определялся минимальный ток срабатывания $I_{0\ c.з.мин}$, затем на вход ИОТ (реле тока KA (рис. 2)) по схеме рис. 2 подавался расчетный тестовый сигнал общей длительностью ~ 1 с, и ток срабатывания ТЗНП $I_{0\ c.з.}$ увеличивался до обеспечения устойчивых несрабатываний защиты. Расчетное значение $K_{пер}$ определялось по формуле

$$K_{пер} = \frac{I_{0\ c.з.}}{I_{0\ c.з.мин}} . \quad (5)$$

Методика проведения испытаний иллюстрируется осциллограммами, полученными на устройстве РЕТОМ-51 и приведенными на рис. 5 – 7.

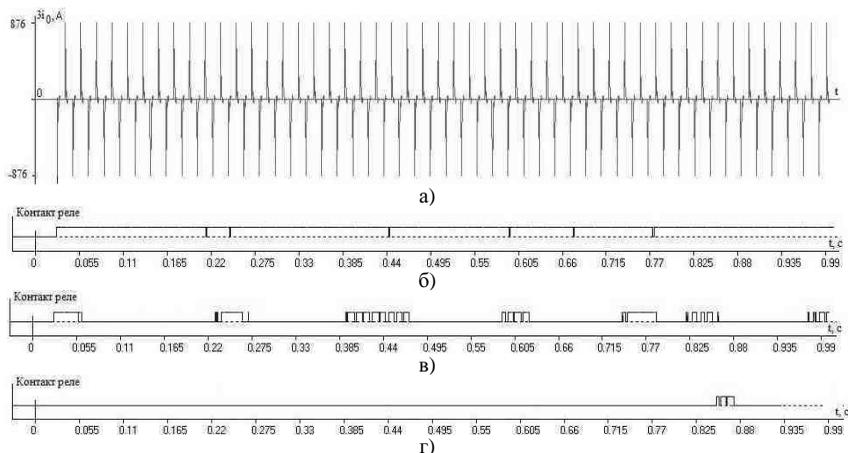


Рис. 5. Осциллограммы работы ТЗНП с ИОТ на базе электромеханического реле типа РТ-40/0,6 при дуговом прерывистом ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью при разных значениях $K_{пер}$: а – переходный ток $3i_0$ в защищаемом присоединении при внешнем ОЗЗ; б, в, г – работа реле при значениях $K_{пер} = 1, K_{пер} = 1,5, K_{пер} = 1,8$ соответственно

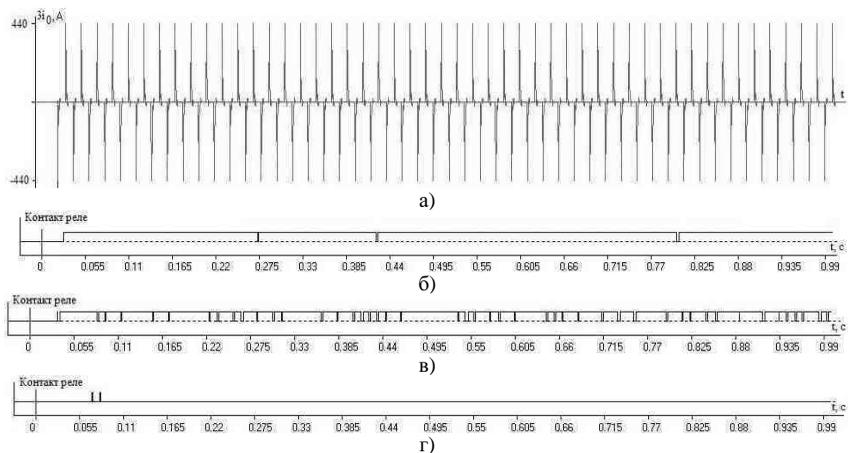


Рис. 6. Осциллограммы работы ТЗНП с ИОТ на базе электромеханического реле типа РТ-40/0,6 при дуговом прерывистом ОЗЗ в сети с высокоомным заземлением нейтрали при разных значениях $K_{пер}$: а – переходный ток $3i_0$ в защищаемом присоединении при внешнем ОЗЗ; б, в, г – работа реле при значениях $K_{пер} = 1, K_{пер} = 1,3, K_{пер} = 1,45$ соответственно

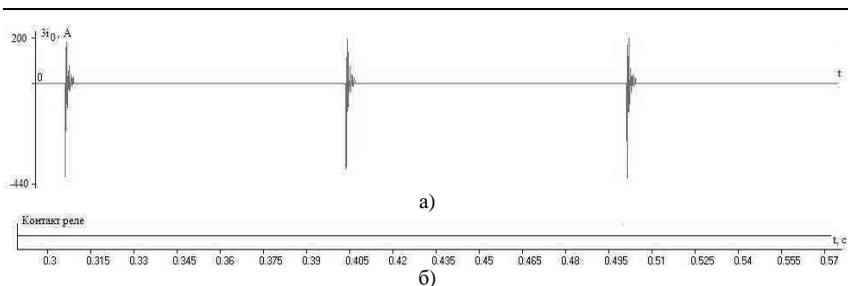


Рис. 7. Осциллограммы работы ТЗНП с ИОТ на базе электромеханического реле типа РТ-40/0,6 при дуговом прерывистом ОЗЗ в сети с резонансным заземлением нейтрали через ДГР: а – переходный ток $3i_0$ в защищаемом присоединении при внешнем ОЗЗ; б – работа реле при $K_{пер} = 1$

Основные параметры тестовых сигналов для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП при различных режимах заземления нейтрали сети приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры тестовых сигналов для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП при дуговых прерывистых ОЗЗ в сетях с различными режимами заземления нейтрали

Тип ИОТ ТЗНП	$I_{0 \text{ с.з. мин.}}$, А	$I_{с \text{ собс.}}$, А	$I_{т \text{ пер. макс.}}$, А	$T_{св}$, мс	Модель дугового ОЗЗ	Режим нейтрали	$T_{силь}$, с
Реле РТ-40/0,2 (параллельное соединение обмоток)	9,6	8	737	5	Петерсена	Изолированная нейтраль	1
Реле РТ-40/0,2 (параллельное соединение обмоток)	9,6	8	370	5	Петерсена	Высокоомное заземление нейтрали	1
Реле РТ-40/0,2 (параллельное соединение обмоток)	9,6	8	370	5	Петерсена	Резонансное заземление нейтрали	1
Реле РТ-40/0,6 (параллельное соединение обмоток)	7	5,83	876	5	Петерсена	Изолированная нейтраль	1
Реле РТ-40/0,6 (параллельное соединение обмоток)	7	5,83	440	5	Петерсена	Высокоомное заземление нейтрали	1
Реле РТ-40/0,6 (параллельное соединение обмоток)	7	5,83	440	5	Петерсена	Резонансное заземление нейтрали	1
Реле РТ-40/0,6 (последовательное соединение обмоток)	5	4,17	780	5	Петерсена	Изолированная нейтраль	1

*Влияние режима заземления нейтрали электрической сети 6 – 10 кВ
на функционирование токовых защит от однофазных замыканий на землю*

Продолжение табл. 1

Тип ИОТ ТЗНП	$I_{0\text{ с.з. мин}}$, А	$I_{C\text{ собес}}$, А	$I_{т\text{ пер. макс}}$, А	$T_{св}$, мс	Модель дугового ОЗЗ	Режим нейтрали	$T_{сис}$, с
Реле РТ-40/0,6 (последовательное соединение обмоток)	5	4,17	390	5	Петерсена	Высокоомное заземление нейтрали	1
Реле РТ-40/0,6 (последовательное соединение обмоток)	5	4,17	390	5	Петерсена	Резонансное заземление нейтрали	1
РТЗ-50 (диапазон уставок d)	3,1	2,583	650	5	Петерсена	Изолированная нейтраль	1
РТЗ-50 (диапазон уставок d)	3,1	2,583	325	5	Петерсена	Высокоомное заземление нейтрали	1
РТЗ-50 (диапазон уставок d)	3,1	2,583	325	5	Петерсена	Резонансное заземление нейтрали	1
РТЗ-51	0,78	0,65	664	5	Петерса и Слепяна	Изолированная нейтраль	1
РТЗ-51	0,78	0,65	332	5	Петерсена	Резонансное заземление нейтрали	1
РТЗ-51	0,78	0,65	332	5	Петерса и Слепяна	Изолированная нейтраль	1

Результаты исследований и их оценка. В табл. 2 дано сопоставление значений $K_{пер}$, рекомендуемых существующими методиками расчетов уставок ТЗНП, и значений $K_{пер}$, полученных методом физико-математического моделирования динамических режимов работы различных исполнений ТЗНП.

Таблица 2. Результаты оценки условий устойчивости несрабатываний различных исполнений ТЗНП при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ для сети, работающей с изолированной нейтралью

Тип ИОТ ТЗНП	Значения $K_{пер}$	
	По существующей методике расчета	Полученные на основе исследований
Реле РТ-40/0,2 (параллельное соединение обмоток)	4,0 – 5,0	1,5
Реле РТ-40/0,2 (последовательное соединение обмоток)	4,0 – 5,0	1,5
Реле РТ-40/0,6 (параллельное соединение обмоток)	4,0 – 5,0	1,5 – 2
Реле РТ-40/0,6 (последовательное соединение обмоток)	4,0 – 5,0	1,5 – 2
РТЗ-50 (диапазон уставок d)	3,0 – 3,5	2,0
РТЗ-51	2,0 – 2,5	

В табл. 3 приведены результаты исследований влияния режима заземления нейтрали на устойчивость функционирования различных исполнений ТЗНП при дуговом прерывистом характере ОЗЗ.

Таблица 3. Влияние режима заземления нейтрали на функционирование ТЗНП при дуговых прерывистых ОЗЗ

Тип ИОТ ТЗНП	Значение $K_{пер}$		
	Изолированная нейтраль	Высокоомное заземление нейтрали	Резонансное заземление нейтрали
Реле РТ-40/0,2 (параллельное соединение обмоток)	~1	< 1	< 1
Реле РТ-40/0,2 (последовательное соединение обмоток)	~1	< 1	< 1
Реле РТ-40/0,6 (параллельное соединение обмоток)	~2	~1,5	~1
Реле РТ-40/0,6 (последовательное соединение обмоток)	~2	~1,5	~1
РТЗ-50 (диапазон уставок d)	~2	~1,65	~1
РТЗ-51	~1	~1	~1

Заключение

Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Рекомендуемые существующими методиками расчета уставок ТЗНП значения коэффициента $K_{пер}$, учитывающие влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование защиты при дуговых прерывистых ОЗЗ, завышены и не учитывают особенности переходных процессов в сетях 6 – 10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, что приводит к значительному снижению чувствительности при устойчивых замыканиях и ограничению области применения ТЗНП.

2. В результате проведенных методом физико-математического моделирования исследований динамических режимов функционирования различных исполнений ТЗНП показано, что значения коэффициента $K_{пер}$ для различных исполнений ТЗНП могут быть уменьшены в 1,5 – 3,0 раза (табл. 2), что позволяет увеличить чувствительность защиты при устойчивых замыканиях и расширить область ее применения.

3. Наиболее тяжелые условия с точки зрения несрабатываний ТЗНП при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ имеют место в кабельных сетях напряжением 6 кВ, работающих с изолированной нейтралью, при возникновении повреждения на шинах для линий максимально возможной длины, выполненных кабелем наибольшего сечения.

4. В электрических сетях, работающих с высокоомным заземлением нейтрали через резистор и с резонансным заземлением нейтрали через ДГР, амплитуда переходного тока при повторных пробоях не увеличивается; для сетей с высокоомным заземлением нейтрали через резистор значение $K_{пер}$ в (1) может быть уменьшено примерно на 25 – 30 % по сравнению со значениями $K_{пер}$ для сетей, работающих с изолированной нейтралью. В компенсированных сетях, работающих с резонансной или близкой к ней настройкой ДГР, значение $K_{пер}$ в (1) может быть принято равным 1.

Библиографический список

1. **Сирота, И.М.** Защита от замыканий на землю в электрических сетях / И.М. Сирота. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955.
2. **Шабад, М.А.** Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ / М.А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2000.
3. **Корогодский, В.А.** Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.А. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Шуин, В.А.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М.: Энергопрогресс, 2001.
5. **Правила** устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.
6. **Шалыт, Г.М.** Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях / Г.М. Шалыт // Тр. ВНИИЭ. – Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – С. 77 – 97.
7. **Лихачев, Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971.
8. **Щуцкий, В.И.** Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
9. **Дударев, Л.Е.** Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях / Л.Е. Дударев, С.И. Запорожченко, Н.М. Лукьянцев // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64 – 66.
10. **Вильгейм, Р.** Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.: Госэнергоиздат, 1959.
11. **Сиротинский, Л.И.** Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах / Л.И. Сиротинский. – М.: Госэнергоиздат, 1959.
12. **Сирота, И.М.** Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова Думка, 1985.

УДК 621.316.925

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ОБМОТКЕ СТАТОРА ГЕНЕРАТОРА ТИПА БРЭ 1301 (ЗЗГ-11)

Е.С. Чугрова, магистр.

Введение. По требованиям ПУЭ [1] на генераторах с номинальной мощностью более 60 МВт, работающих в блоке с трансформатором, должна применяться так называемая стопроцентная защита от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), не имеющая «мертвой зоны», т.е. охватывающая всю обмотку статора, включая нейтраль. В настоящее время на большинстве мощных турбогенераторов, работающих в блоке с трансформатором, применяется защита типа БРЭ 1301 (ЗЗГ-11).

БРЭ 1301 имеет два измерительных органа: блок основной гармоники и блок третьей гармоники (БТГ). Блок основной гармоники представляет собой простую максимальную защиту напряжения нулевой последовательности, подключаемую к обмотке, соединенной по схеме разомкнутого треугольника, трехфазного трансформатора напряжения (ТН) на выводах генератора, и имеет «мертвую зону» $\approx 5 - 15\%$ со стороны нейтрали генератора. Для защиты генератора от ОЗЗ в нейтрали или вблизи нее предназначен БТГ, выполненный в виде реле с торможением. В качестве рабочей величины в БТГ используется сумма третьих гармоник напряжений на выводах обмотки статора и нейтрали генератора ($U_{3\Delta} + U_{3N}$), в качестве тормозной – третья гармоника напряжения на нейтрали U_{3N} .

Условие срабатывания БТГ защиты БРЭ 1301.01 имеет вид

$$|\underline{U}_{раб}| = |\dot{U}_{3B} + \dot{U}_{3N}| \geq |\underline{U}_{торм}| = k_T \cdot |\dot{U}_{3N}|, \quad (1)$$

где $\underline{U}_{раб}$ и $\underline{U}_{торм}$ – рабочая и тормозная величины соответственно; k_T – коэффициент торможения.

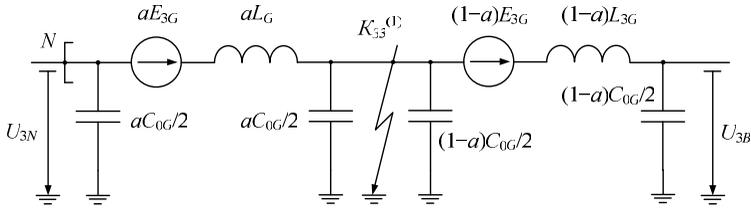
На рис. 1 показано распределение напряжения 3-й гармоники вдоль обмотки статора при ОЗЗ. Из (1) с учетом рис. 1 условие срабатывания можно представить в следующем виде:

$$|\underline{U}_{раб}| = E_{3G} |1 - 2\alpha| \geq |\underline{U}_{торм}| = \alpha k_T E_{3G} \quad (2)$$

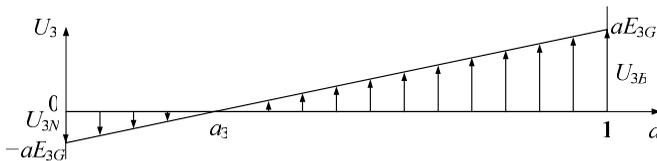
или

$$\frac{\alpha k_T}{1-2\alpha} \leq 1, \quad (3)$$

где α – доля замкнувшихся витков (со стороны нейтрали генератора).



а)



б)

Рис. 1. Схема замещения обмотки статора генератора (а) и распределение 3-й гармоники напряжения вдоль обмотки статора при ОЗЗ (б)

Коэффициент торможения k_T обычно выбирается таким образом, чтобы БТГ устойчиво срабатывал (имел требуемый коэффициент чувствительности) при ОЗЗ в зоне, не охватываемой блоком основной гармоники.

Постановка задачи. Опыт эксплуатации защиты БРЭ 1301 на ряде ТЭС и АЭС выявил случаи отказов функционирования БТГ, однако анализ причин этих отказов в специальной литературе отсутствует. Исследования и опыт разработки, внедрения и эксплуатации защит аналогичного назначения в электрических сетях среднего напряжения 6 – 35 кВ [2 и др.] показал, что часто причиной отказов является влияние электромагнитных переходных процессов при дуговых прерывистых (перемежающихся) ОЗЗ. Принцип действия блока БТГ защиты типа БРЭ 1301 (3ЗГ-11) обоснован только для установившихся режимов повреждений в обмотке статора генераторов. Можно предположить, что одной из возможных причин отказов защиты БРЭ 1301 является неучет особенностей работы БТГ в переходных режимах ОЗЗ.

Учитывая ограниченные возможности проведения научных экспериментов на действующих электроустановках высокого напряжения и физического моделирования, наиболее подходящим методом исследования процессов функционирования блока БТГ в переходных режимах ОЗЗ является математическое моделирование на ЭВМ.

С учетом изложенного ниже рассматриваются вопросы построения математической модели БТГ защиты генератора БРЭ 1301 для исследования особенностей ее работы в переходных режимах ОЗЗ.

Функционально-структурная схема БТГ. Получена на основе принципиальной электрической схемы [3], приведена на рис. 2. БТГ включает в себя линейные преобразователи ЛП1 и ЛП2, полосовые фильтры ПФ1 – ПФ4, двухполупериодные выпрямители, пороговые органы ПО1 и ПО2, сглаживающий сумматор Σ , реагирующий орган РО.

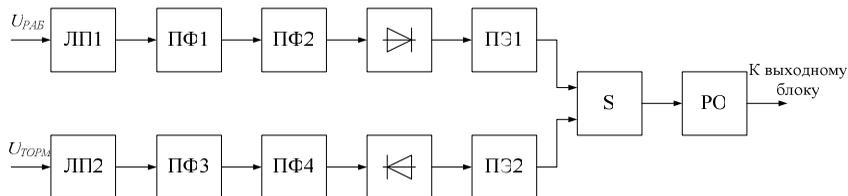


Рис. 2. Функционально-структурная схема БТГ защиты БРЭ 1301

Для построения математических моделей основных функциональных узлов и элементов БТГ целесообразно использовать интегрированную систему моделирования с пакетом расширения Simulink [4], позволяющую достаточно просто получить необходимую для исследований особенностей функционирования защиты БРЭ 1301 при дуговых прерывистых ОЗЗ комплексную модель системы «генератор – БТГ».

При использовании системы моделирования MATLAB математические модели функциональных узлов и элементов БТГ, в зависимости от их сложности, удобно представлять либо в форме передаточных функций вида $K(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)}$, либо в форме системы дифференциальных или алгебро-дифференциальных уравнений состояния, для решения нетрудно применить известные принципы моделирования на аналоговых вычислительных машинах [5].

Ниже рассматриваются сформированные в форме передаточных функций математические модели наиболее сложных функциональных

узлов БТГ: полосовых фильтров ПФ, двухполупериодных выпрямителей, пороговых органов ПО, сглаживающего сумматора и реагирующего органа РО. На примере полосового фильтра ПФ рассматривается методика получения модели в форме уравнений состояния.

Математические модели функциональных узлов и элементов БТГ в форме передаточных функций. Модели полосовых фильтров третьей гармоники ПФ1 – ПФ4. Принципиальная электрическая схема фильтра ПФ1 рабочей цепи БТГ приведена на рис. 3.

Для схемы рис. 3 после преобразований получим

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = - \frac{R7 \cdot C2 \cdot p + \frac{R7}{R5 + R6}}{R7 \cdot (R2 + R142) \cdot C1 \cdot C2 \cdot p^2 + (R2 + R142) \cdot \left(\frac{R7 \cdot C1}{R5 + R6} + C1 + C2 \right) \cdot p + \frac{R2 + R142}{R3 + R4} + \frac{R2 + R142}{R5 + R6} + 1} \quad (4)$$

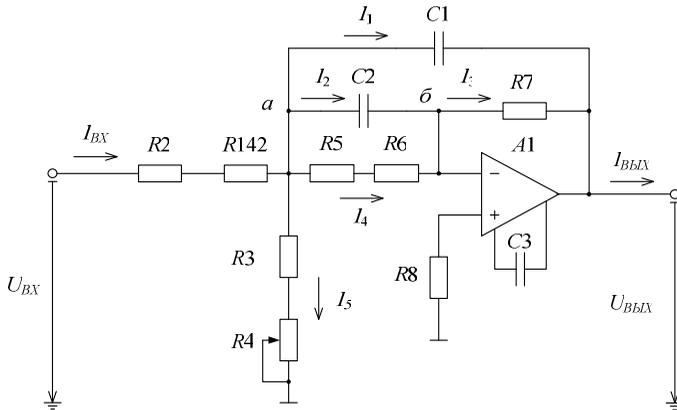


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема полосового фильтра ПФ1

Передаточную функцию фильтра ПФ1 удобно представить выражением вида

$$K(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)} = \frac{a_1 \cdot p + a_2}{b_1 \cdot p^2 + b_2 \cdot p + b_3} \quad (5)$$

Коэффициенты a и b в выражении (5) для фильтра ПФ1 (рис. 3) цепи рабочего напряжения с частотой настройки 140 Гц [3] равны:

$$a_1 = R7 \cdot C2 ; \quad (6)$$

$$a_2 = \frac{R7}{R5 + R6} ; \quad (7)$$

$$b_1 = R7 \cdot (R2 + R142) \cdot C1 \cdot C2 ; \quad (8)$$

$$b_2 = (R2 + R142) \cdot \left(\frac{R7 \cdot C1}{R5 + R6} + C1 + C2 \right) ; \quad (9)$$

$$b_3 = \frac{R2 + R142}{R3 + R4} + \frac{R2 + R142}{R5 + R6} + 1. \quad (10)$$

Для фильтра ПФ2 цепи рабочего напряжения с частотой настройки 160 Гц коэффициенты в выражении (7) равны:

$$a_1 = R14 \cdot C5 ; \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{R14}{R12 + R13} ; \quad (14)$$

$$b_1 = R14 \cdot R9 \cdot C4 \cdot C5 ; \quad (15)$$

$$b_2 = R9 \cdot \left(\frac{R14 \cdot C4}{R12 + R13} + C4 + C5 \right) ; \quad (16)$$

$$b_3 = \frac{R9}{R10 + R11} + \frac{R9}{R12 + R13} + 1. \quad (17)$$

Коэффициенты a и b в выражении (7) для фильтров ПФ3 и ПФ4 определяются аналогично соответствующим коэффициентам фильтров ПФ1 и ПФ2.

Модель двухполупериодного выпрямителя. Принципиальная электрическая схема выпрямителя цепи рабочего напряжения приведена на рис. 4.

Для получения модели математическое описание работы двухполупериодного выпрямителя составляется для двух случаев:

- а) входное напряжение положительное;
- б) входное напряжение отрицательное.

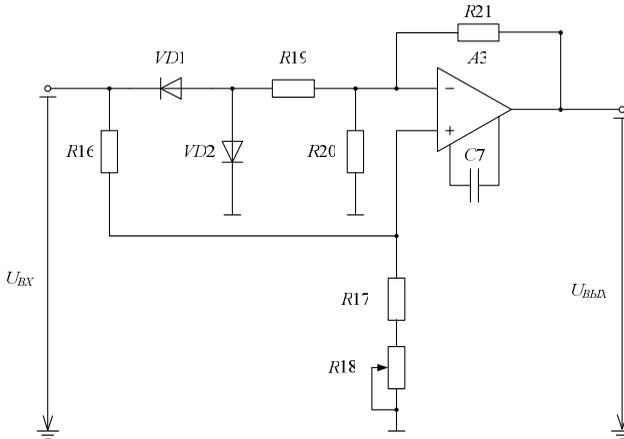


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема двухполупериодного выпрямителя

Принимая диоды $VD1$ и $VD2$ идеальными, принципиальную электрическую схему выпрямителя при положительном входном напряжении можно представить в виде, показанном на рис. 5.

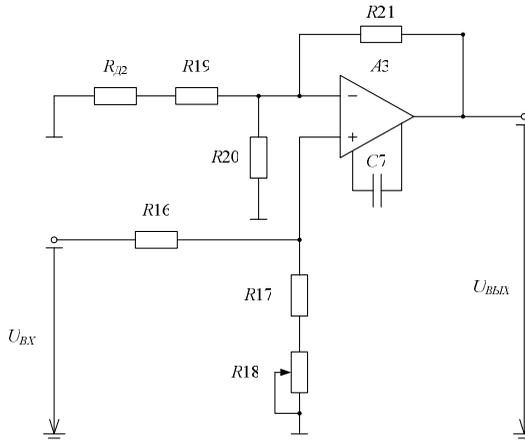


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема выпрямителя при $U_{BX} > 0$

Согласно схеме рис. 5, коэффициент передачи выпрямителя при U_{BX} равен

$$K^+ = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{(R17 + R18) \cdot ((R_{Д2} + R19) \cdot (R20 + R21) + R20 \cdot R21)}{R20 \cdot (R_{Д2} + R19) \cdot (R16 + R17 + R18)}. \quad (18)$$

При $R_{Д2} \ll R19, R20$, что обычно обеспечивается, коэффициент передачи при $U_{ВХ} > 0$ равен:

$$K^+ = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{(R17 + R18) \cdot (R19 \cdot (R20 + R21) + R20 \cdot R21)}{R20 \cdot R19 \cdot (R16 + R17 + R18)}. \quad (19)$$

Принципиальная электрическая схема выпрямителя при отрицательном входном напряжении ($U_{ВХ} < 0$) показана на рис. 6.

Согласно схеме рис. 6, коэффициент передачи выпрямителя при отрицательном входном напряжении будет равен

$$K^- = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{(R17 + R18) \cdot ((R_{Д1} + R19) \cdot (R20 + R21) + R20 \cdot R21)}{R20 \cdot (R_{Д1} + R19) \cdot (R16 + R17 + R18)} - \frac{R21}{R_{Д1} + R19}. \quad (20)$$

При $R_{Д1} \ll R19, R20$

$$K^- = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{(R17 + R18) \cdot (R19 \cdot (R20 + R21) + R20 \cdot R21)}{R20 \cdot R19 \cdot (R16 + R17 + R18)} - \frac{R21}{R19}. \quad (21)$$

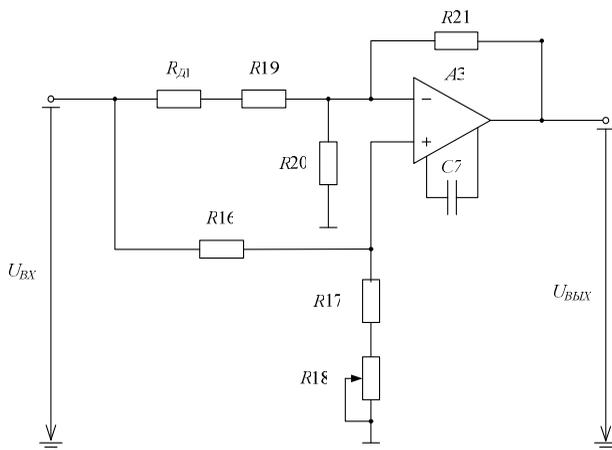


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема выпрямителя при $U_{ВХ} < 0$

Математическая модель двухполупериодного выпрямителя цепи тормозного напряжения аналогична модели выпрямителя цепи рабочего напряжения с учетом того, что напряжение на выходе выпрямителя будет всегда отрицательное.

Модель порогового органа. Принципиальная электрическая схема порогового органа цепи рабочего напряжения приведена на рис. 7.

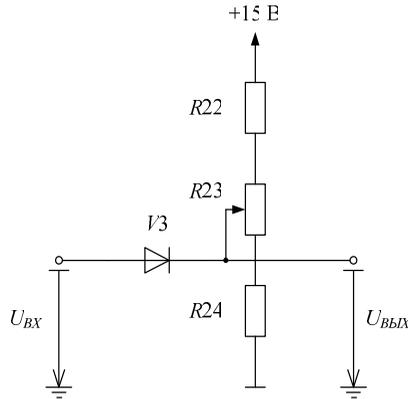


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема порогового органа цепи рабочего напряжения

Напряжение на выходе порогового органа будет равно входному напряжению, если последнее больше порогового напряжения $U_{ПОР}$, во всех остальных случаях выходное напряжение будет равно $U_{ПОР}$.

Согласно схеме рис. 7, для порогового напряжения можно записать следующее выражение:

$$U_{ПОР} = 15 \cdot \frac{(0+1) \cdot R23 + R24}{R22 + R23 + R24}. \quad (22)$$

Принципиальная электрическая схема порогового органа цепи тормозного напряжения приведена на рис. 8.

Согласно схеме рис. 8, для порогового напряжения можно записать следующее выражение:

$$U_{ПОР} = -15 \cdot \frac{R49}{R48 + R49}. \quad (23)$$

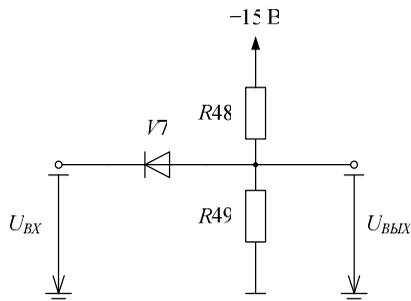


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема порогового органа цепи тормозного напряжения

Модель сглаживающего сумматора. Передаточная функция сглаживающего сумматора по схеме рис. 9 описывается следующим выражением:

$$K(p) = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ.1} + U_{ВХ.2}} = \frac{a_1 \cdot p^2 + a_2 \cdot p + a_3}{b_1 \cdot p^2 + b_2 \cdot p + b_3}, \quad (24)$$

где

$$a_1 = R26 \cdot (R50 + R52) \cdot C47 \cdot C50 - R26 \cdot R152 \cdot C8 \cdot C47; \quad (25)$$

$$a_2 = R26 \cdot R151 \cdot (R50 + R52) \cdot C47 - R152 \cdot C47 - R26 \cdot C8; \quad (26)$$

$$a_3 = -1; \quad (27)$$

$$b_1 = R26 \cdot R152 \cdot C45 \cdot C47; \quad (28)$$

$$b_2 = \frac{R26 \cdot R139 \cdot R152 \cdot C47}{R150} + R26 \cdot C45 \quad (29)$$

$$b_3 = \frac{R26 \cdot R139}{R150}; \quad (30)$$

$$R150 = R139 \cdot R140 + R53 \cdot R140 + R139 \cdot R53; \quad (31)$$

$$2 \cdot C8 + C45 = C50; \quad (32)$$

$$\frac{2}{R26} + \frac{1}{R25} + \frac{1}{R53} - \frac{R139 \cdot R140}{R53 \cdot R150} = R151; \quad (33)$$

$$R152 = 2 \cdot (R50 + R52) + R136 + 0,5R138. \quad (34)$$

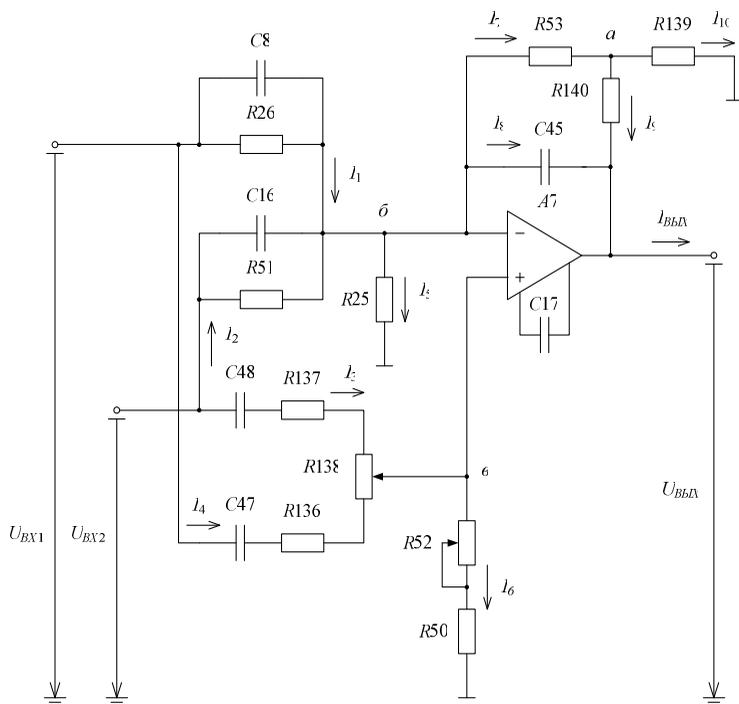


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема сглаживающего сумматора

Модель реагирующего органа. Принципиальная электрическая схема реагирующего органа (РО) приведена на рис. 10.

Наличие в схеме РО диодов, выполняющих функции коммутационных элементов – ключей, открывающихся или закрывающихся в зависимости от разности напряжений на диодах, не позволяет получить модель РО в форме передаточной функции непосредственно по схеме рис. 10. С учетом этого функционирование РО в зависимости от состояния диодов – ключей целесообразно разделить на несколько этапов:

1 этап: от момента времени $t = t_1$, соответствующего появлению на входе РО положительного напряжения, до момента $t = t_2$, соответствующего появлению на входе РО отрицательного напряжения (установление начального состояния схемы РО в режиме без ОЗЗ);

2 этап: от момента $t = t_2$ (возникновение ОЗЗ в обмотке статора) до $t = t_3$, соответствующего появлению на выходе РО положительного напряжения;

3 этап: от момента $t = t_3$ до момента $t = t_4$, соответствующего появлению на входе РО отрицательного напряжения (исчезновение ОЗ3 в обмотке статора);

4 этап: от момента $t = t_4$ до возникновения повторного ОЗ3 (возврат схемы в начальное состояние).

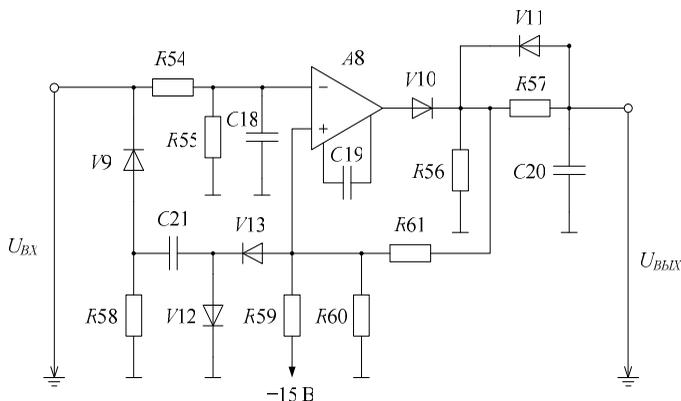


Рис. 10. Принципиальная электрическая схема реагирующего органа

С выхода сглаживающего сумматора на вход реагирующего органа подается положительное напряжение. В этом режиме диоды V9, V12, V13 будут закрыты. На первом этапе, соответствующем нормальному режиму работы (без ОЗ3 в обмотке статора), схема замещения РО может быть представлена в виде, приведенном на рис. 11.

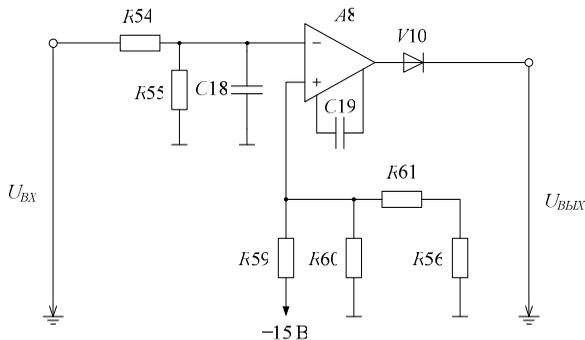


Рис. 11. Схема замещения РО на первом этапе

Передаточная функция звена, моделирующего переходные процессы на инвертирующем входе операционного усилителя А8, в этом режиме имеет вид

$$H_1(p) = \frac{U^-(p)}{U_{BX}(p)} = \frac{R55}{R54 \cdot R55 \cdot C18 \cdot p + R54 + R55}. \quad (35)$$

На втором этапе схема замещения РО может быть представлена в виде, показанном на рис. 12.

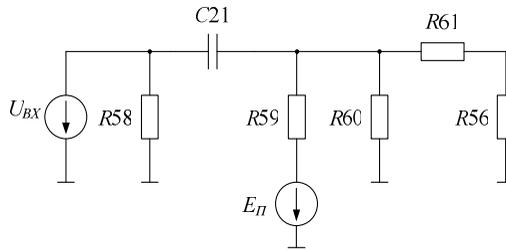


Рис. 12. Схема замещения для расчета процесса заряда конденсатора C21 на втором этапе

Процесс заряда конденсатора C21 по схеме рис. 12 будет описываться уравнением

$$U_{C21}(p) = \frac{U_{BX} - E_{\mathcal{E}}}{R_{\mathcal{E}} \cdot C21 \cdot p + 1}, \quad (36)$$

где

$$E_{\mathcal{E}} = -E_{II} \cdot \frac{R60 \cdot (R56 + R61)}{R60 \cdot (R56 + R61) + R59 \cdot (R56 + R60 + R61)}; \quad (37)$$

$$R_{\mathcal{E}} = \frac{R59 \cdot R60 \cdot (R56 + R61)}{R60 \cdot (R56 + R61) + R59 \cdot (R56 + R60 + R61)}. \quad (38)$$

На третьем этапе схема замещения РО может быть представлена в виде, показанном на рис. 13. В момент времени $t = t_3$ разность напряжений на входах операционного усилителя А8 становится положительной и на выходе появляется положительное напряжение.

В результате сравнения величин $R_{\mathcal{E}}$ и $E_{\mathcal{E}}$ на втором и третьем этапах и с учетом того, что $E_{\mathcal{E}} \ll E_{II}$, можно приближенно принять, что

процесс заряда конденсатора $C21$ на обоих этапах будет описываться одним уравнением (36).

С учетом этого передаточную функцию звена, моделирующего процесс заряда конденсатора, можно представить в следующем виде:

$$H_2(p) = \frac{U_{C21}(p)}{U_{BX} - E_Э} = \frac{1}{R_Э \cdot C21 \cdot p + 1}. \quad (39)$$

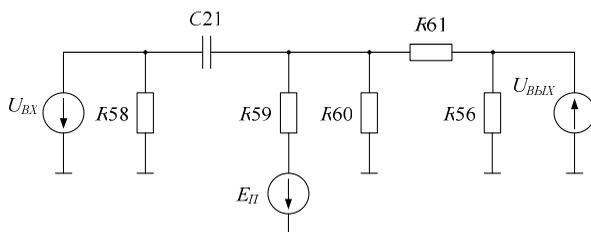


Рис. 13. Схема замещения для расчета процесса заряда конденсатора $C21$ на третьем этапе

Передаточную функцию звена, моделирующего процесс заряда конденсатора $C20$ на третьем этапе, можно представить в следующем виде:

$$H_3(p) = \frac{U_{BВЫХ.Р0}}{U_{BВЫХ.А8}} = \frac{1}{R57 \cdot C20 \cdot p + 1}. \quad (40)$$

На четвертом этапе при исчезновении ОЗЗ напряжение на выходе сумматора становится положительным. При появлении на входе реагирующего органа положительного напряжения диод $V9$ закрывается, конденсатор $C21$ начинает разряжаться по контуру $R58-C21-V13$, при этом процесс разряда конденсатора не влияет на величину напряжения на неинвертирующем входе операционного усилителя. Передаточную функцию звена, моделирующего процесс заряда конденсатора $C21$, можно представить в следующем виде:

$$H_4(p) = \frac{1}{R58 \cdot C21 \cdot p + 1}. \quad (41)$$

При появлении отрицательного напряжения на выходе операционного усилителя диод $V10$ закрывается и конденсатор $C20$ начинает разряжаться по контуру $R56-C20-V11$. Напряжение на выходе реагирующего органа уменьшается до нулевого значения.

Передаточная функция звена, моделирующего процесс разряда конденсатора C_{20} , имеет вид

$$H_5(p) = \frac{1}{R56 \cdot C20 \cdot p + 1}. \quad (42)$$

Математические модели функциональных узлов и элементов БТГ в форме системы алгебро-дифференциальных уравнений состояния. Недостатком моделей, представленных в форме передаточных функций, являются трудности настройки основных функциональных узлов и элементов БТГ, осуществляемой посредством изменения значений сопротивлений принципиальной схемы, что приводит к необходимости пересчета множества коэффициентов a и b передаточных функций, а также трудности получения моделей узлов, содержащих переключаемые элементы (например, РО). Применение моделей, записанных в форме смешанной системы алгебро-дифференциальных уравнений состояния, позволяет получить более удобные для проведения вычислительных экспериментов модели. В качестве примера рассмотрим способ получения математической модели полосового фильтра ПФ1, записанной в указанной форме.

Для принципиальной схемы фильтра ПФ1 (рис. 3) можно записать следующую систему алгебро-дифференциальных уравнений:

$$\frac{du_{C1}}{dt} = \frac{1}{C1} i_1; \quad (43)$$

$$\frac{du_{C2}}{dt} = \frac{1}{C2} i_2. \quad (44)$$

$$i_1 + i_2 + i_4 + i_5 - i_{BX} = 0; \quad (45)$$

$$i_2 + i_3 - i_4 = 0; \quad (46)$$

$$u_{C1} - u_{C2} - i_3 R7 = 0; \quad (47)$$

$$u_{C2} - i_4 (R5 + R6) = 0; \quad (48)$$

$$u_a - u_{C2} - u_6 = 0; \quad (49)$$

$$u_6 = u_{BX}^- = u_{BX}^+ = 0; \quad (50)$$

$$u_a - i_5 (R3 + R4) = 0; \quad (51)$$

$$u_{BX} - u_a - i_{BX} (R2 + R142) = 0; \quad (52)$$

$$u_6 - i_3 R_7 - u_{\text{ВЫХ}} = 0. \quad (53)$$

Структурная схема модели для решения системы уравнений (41) – (53) приведена на рис. 14. Согласно схеме рис. 14, данная форма записи и представления математических моделей функциональных узлов и элементов БТГ позволяет просто изменять параметры отдельных элементов принципиальной электрической схемы, что необходимо для настройки модели и оптимизации ее параметров.

Аналогичным образом могут быть получены математические модели в форме систем алгебро-дифференциальных уравнений и соответствующих им структурных математических схем из элементов системы MATLAB и для других функциональных узлов БТГ защиты БРЭ 1301.

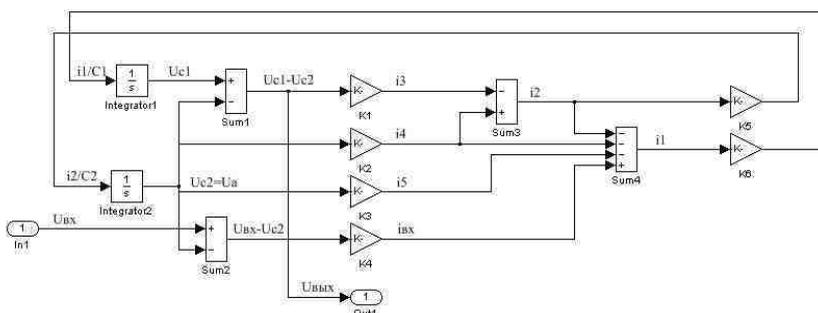


Рис. 14. Структурная схема модели для решения системы уравнений (41) – (53)

На основе разработанных математических моделей основных функциональных узлов с использованием системы моделирования Simulink получена полная модель БТГ защиты БРЭ 1301, с использованием которой выполнены исследования особенностей ее функционирования в условиях дуговых прерывистых ОЗЗ в обмотке статора защищаемого генератора [6, 7].

Библиографический список

1. **Правила** устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: НИЦ ЭНАС, 2007.
2. **Шуин, В.А.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М.: Энергопрогресс, 2001.
3. **Блок** защиты генераторов типа БРЭ 1301. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИАЕЖ.656122.018 ТО. – Чебоксары, 1983.
4. **Черных, И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008.

5. **Урмаев, А.С.** Основы моделирования на аналоговых вычислительных машинах / А.С. Урмаев. – М.: Наука, 1974.

6. **Электроэнергетика** России: современное состояние, проблемы и перспективы: сб. науч. тр. / под ред. М.Ш. Мисриханова, Д.Р. Любарского, В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2008.

7. **Современные** направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. – М.: Научно-инженерное информационное агентство, 2009.