

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110-220 КВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ MATLAB

И.Ю. Иванов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Описывается математическая модель электроэнергетической системы, реализованная в среде Matlab для исследования работы дифференциальной защиты линий электропередачи напряжением 110-220 кВ.

Ключевые слова: дифференциальная защита линии, насыщение трансформаторов тока, переходный режим, моделирование энергосистемы.

В результате развития компьютерных технологий появилась возможность виртуального испытания органов релейной защиты (РЗ) в системе реального времени. Современные средства автоматического проектирования позволяют визуализировать процесс работы. Это дает возможность следить за входными и выходными данными системы РЗ, а также за промежуточными расчетами.

В данной работе была создана модель электроэнергетической системы (ЭЭС) для исследования работы дифференциальной защиты линии (ДЗЛ). Для реализации модели была задействована программно-математическая среда виртуального проектирования систем реального времени *MATLAB*.

Анализ работы ДЗЛ проводился на трехфазной модели ЭЭС, состоящей из источников питания C_1, C_2 ; нагрузки, подключенной через понижающие трансформаторы T_1, T_2 ; выключателей B_1, B_2 ; линии электропередачи $Л$; трансформаторов тока $ТТ_1, ТТ_2$. Вид моделируемой ЭЭС представлен на рис. 1. Параметры системы, линии, трансформаторов тока, используемые при моделировании, представлены в таблице.

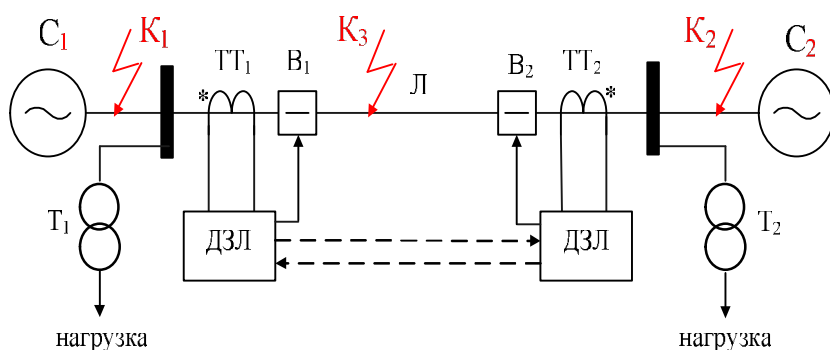


Рис. 1. Однолинейная схема модели участка системы ЭЭС

При моделировании стационарных и аварийных режимов ЭЭС в ДЗЛ формируются два основных сигнала:

– дифференциальный ток, пропорциональный геометрической сумме токов, замеренных на границах зоны защиты;

– тормозной ток, пропорциональный сквозному току короткого замыкания (КЗ).

Параметры элементов ЭЭС, используемые при моделировании

Параметры системы	$U = 110 \text{ кВ}; f = 50 \text{ Гц}; X/R = 10 \div 20; k_{\max} = 10 \div 30$
Удельные параметры линии	$R_{\text{луд}} = 0,109 \text{ Ом/км}; X_{\text{луд}} = 0,39 \text{ Ом/км}$ $R_{0\text{уд}} = 0,44 \text{ Ом/км}; X_{0\text{уд}} = 1,44 \text{ Ом/км}$
Параметры ТТ ₁ (трансформатор тока ТВ-110-IX-3)	$n=1000/5; R_2 = 4,25 \text{ Ом}; Z_{\text{нагр}} = 2,75 \text{ Ом}; U_k = 784,5 \text{ В}$
Параметры ТТ ₂ (идеальный ТТ)	$n=1000/5$

При этом условии срабатывания ДЗЛ задается следующими соотношениями:

$$I_{DIF} > I_{D.SET};$$

$$I_{D.SET} = I_{D.0} + k_{RES} \cdot I_{RES},$$

где I_{DIF} – дифференциальный ток;

$I_{D.SET}$ – уставка срабатывания ДЗЛ;

$I_{D.0}$ – начальный порог срабатывания ДЗЛ;

k_{RES} – коэффициент торможения;

I_{RES} – тормозной ток.

Модель позволяет исследовать поведение ДЗЛ в следующих режимах:

– внутреннее КЗ (K_3);

– внешнее КЗ (K_1 и K_2);

– КЗ, сопровождающиеся насыщением трансформатора тока (ТТ).

Последний режим представляет особый интерес, так как погрешности ТТ в переходных режимах КЗ оказывают большое влияние на работу ДЗЛ ввиду возможности неселективного срабатывания защиты при КЗ вне зоны действия. Опасность переходных режимов работы ТТ с аperiodической составляющей в первичном токе заключается в том, что при этом погрешности ТТ оказываются существенно выше, чем в установившемся режиме [1]. Первый момент насыщения ТТ, нагрузка на который выбрана по условию 10-процентной погрешности в установившемся режиме, может возникнуть через 2-3 миллисекунды после начала КЗ.

Физической причиной неудовлетворительных характеристик ДЗЛ во время переходных режимов КЗ является непригодность защиты к работе в условиях резкого уменьшения вторичного тока плеча, в котором произошло насыщение ТТ. Это может привести к излишнему увеличению дифференциального тока и неселективной работе ДЗЛ при внешнем КЗ.

Важной функцией математической модели является возможность осциллографирования аналоговых и дискретных сигналов в различных режимах работы защищаемого объекта.

На рис. 2, а представлены осциллограммы токов плеч фазы А ДЗЛ при внешнем однофазном КЗ K_2 (параметры системы $X/R=10 \div 20$; $k_{\max} = 10$), сопровождающемся насыщением трансформатора тока ТТ₁.

По рис. 2, б можно проанализировать сигналы, введенные на входе виртуального регистратора аварийных событий (РАС) при данном повреждении. Так, видно, что КЗ возникает в момент времени 0,2 сек, что приводит (через 13 мс) к превышению дифференциального тока (зеленый сигнал) над уставкой срабатывания (красный сигнал), в результате появляются дискретные сигналы «зона срабатывания ДЗЛ», «выходные реле ДЗЛ».

Следовательно, при внешнем КЗ, сопровождающемся насыщением ТТ одного из плеч, возможна излишняя работа ДЗЛ. Это является недостатком данной защиты.

Для того чтобы обеспечить селективность действия ДЗЛ в режиме насыщения ТТ, современные производители микропроцессорных устройств РЗ предлагают следующее [2]:

1) применение повышенных коэффициентов торможения или различных видов торможения;

2) увеличение выдержки времени ДЗЛ.

Однако при использовании данных мер теряются чувствительность и быстродействие данной защиты.

Для устранения указанного недостатка в данной работе в алгоритме функционирования ДЗЛ используются вспомогательные признаки переходных процессов, свойственные режимам внутреннего или внешнего КЗ, в дополнение к традиционному принципу действия, основанному на вычислении дифференциального и тормозного токов.

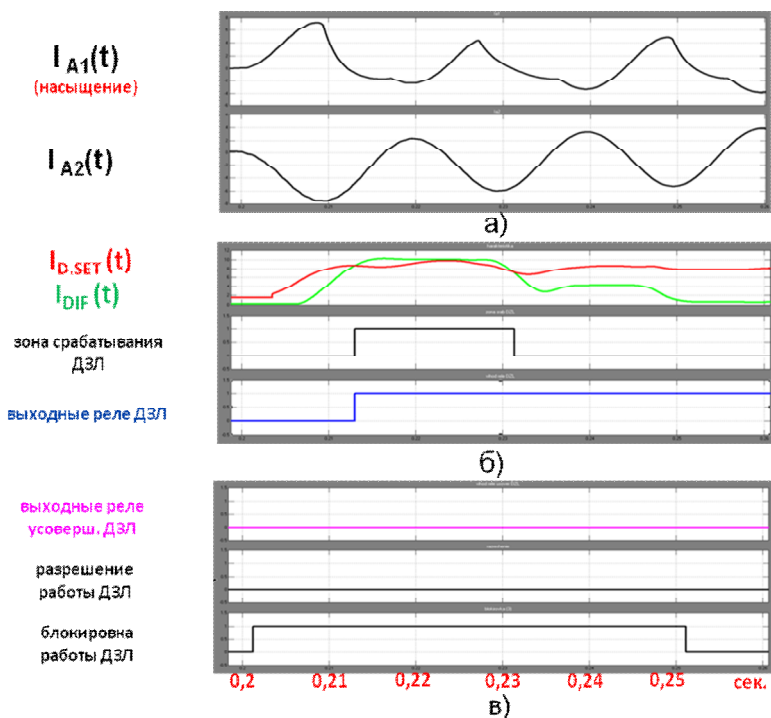


Рис. 2 . Осциллограммы, записанные виртуальным РАС при внешнем КЗ⁽¹⁾:

- а) мгновенные значения токов плеч фазы А ДЗЛ;
- б) сигналы для анализа работы традиционной ДЗЛ;
- в) сигналы для анализа работы усовершенствованной ДЗЛ

К самым информативным и простым в реализации относятся следующие вспомогательные признаки:

1) совпадение по времени полуоволн одинаковой полярности токов плеч дифференциальной защиты при внутренних КЗ;

2) превышение длительности интервала времени от максимума дифференциального тока до минимума Δt_2 над длительностью интервала времени от момента появления дифференциального тока I_{DIF} до его максимума Δt_1 при внешних КЗ;

3) отставание фронта волны дифференциального тока от фронта волны тормозного тока при внешних КЗ.

Первый вспомогательный признак широко используется в технике релейной защиты при реализации дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) линий электропередачи [3].

Второй и третий вспомогательные признаки основаны на различии свойств насыщенного и ненасыщенного ТТ и поэтому проявляются тем интенсивнее, чем больше изменяется магнитное состояние сердечника насыщенного ТТ за период. Следовательно, устойчивость проявления вспомогательных признаков повышается с ростом тока КЗ (при прочих равных условиях), а при малых токах КЗ устойчивость их проявления теряется. Устойчивость проявления также возрастает при условии, если насыщается ТТ только одного плеча ДЗЛ.

На рис. 3 представлены осциллограммы, необходимые для анализа алгоритма определения внутреннего КЗ по первому вспомогательному признаку, где $I_1(t)$, $I_2(t)$ – мгновенные значения токов плеч ДЗЛ.

Алгоритм определения внутреннего КЗ по первому вспомогательному признаку следующий. При возникновении КЗ в ЭЭС:

- происходит пуск защиты;
- выделяются положительные полуволны токов плеч дифференциальной защиты $I_{1+}(t)$ и $I_{2+}(t)$;
- измеряется время совпадения положительных полуволн токов плеч дифференциальной защиты $t_{совп}$;
- сравнивается указанное время с заданным временем блокировки $t_{блок}$.

Время блокировки $t_{блок}$ задается в зависимости от принятого угла блокирования действия защиты на отключения β , который регулируется в диапазоне $\pm(40-65)^\circ$ (по аналогии с углом блокирования, задаваемого в защитах ДФЗ).

По представленным осциллограммам на рис. 3 видно, что при внешнем КЗ время совпадения $t_{совп}$ является близким к нулю, при внутреннем КЗ данное время является большой величиной (около 10 мс).

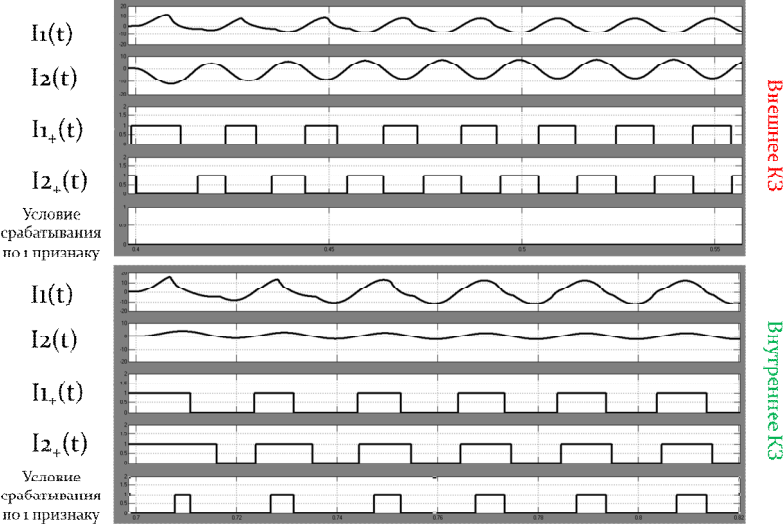


Рис. 3. Первый вспомогательный признак при внешних и внутренних КЗ

На рис. 4 представлены осциллограммы, необходимые для анализа алгоритма определения внешнего КЗ по второму вспомогательному признаку. Алгоритм работы данного блока направлен на решение обратной задачи, то есть выявление внешнего КЗ.

Алгоритм определения внешнего КЗ по второму вспомогательному признаку следующий. При возникновении КЗ в ЭЭС:

- происходит пуск защиты;
- определяются моменты наступления экстремумов мгновенного значения дифференциального тока I_{DIF} ;
- сравниваются два интервала времени Δt_1 и Δt_2 (Δt_1 – интервал времени от момента появления дифференциального тока до его максимума; Δt_2 – интервал времени от максимума дифференциального тока до его минимума).

Для определения экстремумов замеряется величина мгновенного значения дифференциального тока I_{DIF} , затем берется производная мгновенного значения дифференциального тока по времени dI_{DIF}/dt .

По представленным осциллограммам на рис. 4 видно, что при внешних КЗ выполняется условие $\Delta t_2 > \Delta t_1$.

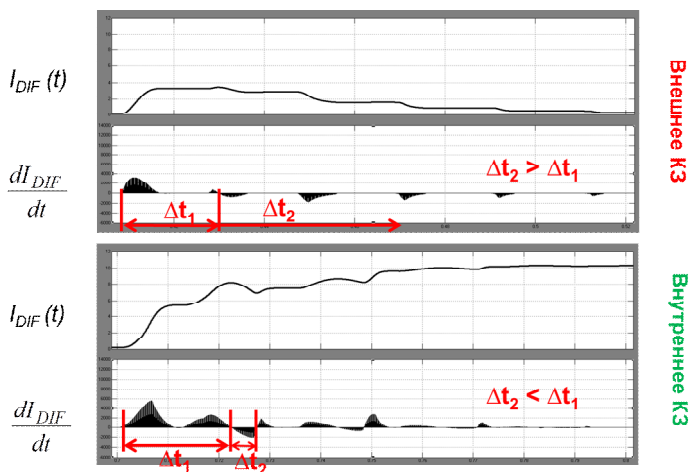


Рис. 4. Второй вспомогательный признак при внешних и внутренних КЗ

На рис. 5 представлены осциллограммы, необходимые для анализа алгоритма определения внешнего КЗ по третьему вспомогательному признаку.

Алгоритм определения внешнего КЗ по третьему вспомогательному признаку следующий. При возникновении КЗ в ЭЭС:

- происходит пуск защиты;
- регистрируется увеличение мгновенного значения тормозного тока;
- анализируется фронт волны мгновенного значения дифференциального тока.

По представленным осциллограммам на рис. 5 видно, что при внешних КЗ в первый момент возникновения повреждения фронт волны дифференциального тока I_{DIF} отстает от фронта волны тормозного тока I_{RES} .

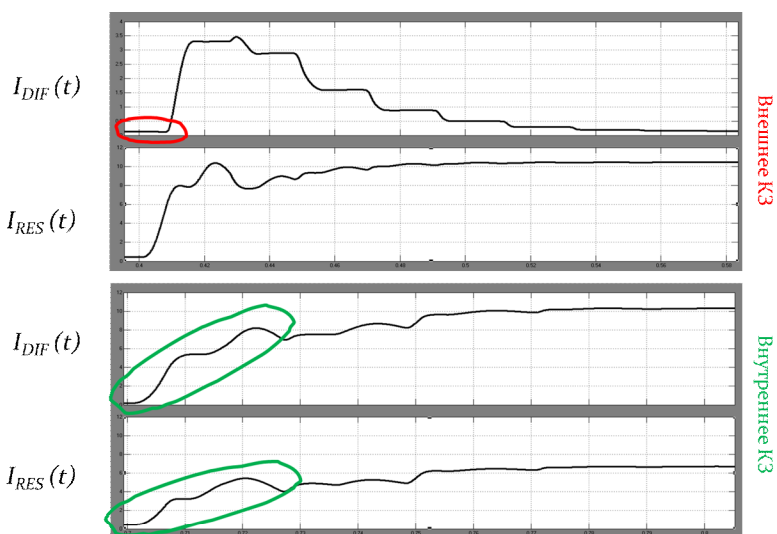


Рис. 5. Третий вспомогательный признак при внешних и внутренних КЗ

На основе вспомогательных признаков в рамках созданной математической модели ЭЭС в алгоритме работы ДЗЛ реализованы:

- разрешающий блок (РБ), используемый для разрешения работы ДЗЛ при выявлении КЗ в зоне действия защиты;
- запрещающий блок (ЗБ), используемый для блокирования работы ДЗЛ при выявлении КЗ вне зоны действия защиты.

На рис. 2, в показаны добавленные в виртуальный РАС дискретные сигналы «разрешение работы ДЗЛ», «блокировка работы ДЗЛ», получаемые с соответствующих выходов блоков РБ и ЗБ.

Благодаря применению быстродействующего пускового органа, запускающего работу РБ и ЗБ, внешнее КЗ удастся определить до появления сигнала «зона срабатывания ДЗЛ». Тем самым удастся предотвратить неселективную работу ДЗЛ при внешнем КЗ (сигнал «выходные реле усовершенствованной ДЗЛ» отсутствует), не загружая защиту и не увеличивая выдержку времени.

Заключение. Разработанная модель позволяет исследовать работу ДЗЛ при различных режимах защищаемого объекта.

С помощью модели можно программно:

- сформировать дифференциальные и тормозные токи ДЗЛ;
- задать характеристику срабатывания ДЗЛ;
- реализовать выходные цепи отключения и сигнализации;
- визуализировать динамику работы ДЗЛ при КЗ в зоне и вне зоны действия защиты.

Дополнительные блоки РБ и ЗБ обеспечивают правильную работу ДЗЛ при внешних и внутренних КЗ, при этом сохраняя чувствительность и быстродействие защиты. Многократные испытания разработанной ДЗЛ в различных режимах позволяют судить о корректности алгоритма работы защиты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багинский Л.В. Переходные процессы в однофазной дифференциальной группе трансформаторов тока при глубоких насыщениях // Электричество. – 1984. – № 12. – С. 11-16.

2. Рекомендации по выбору уставок продольной дифференциальной защиты линии электропередачи типа ШЭ2607 091-93. 2008. – НПП «ЭКРА». – 16 с.
3. Будаев М.И. Высокочастотные защиты линий 110-220 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 112 с.

Статья поступила в редакцию 30 января 2012 г.

RESEARCH ON DIFFERENTIAL PROTECTION OF TRANSMISSION LINES FOR 110-220 KV VOLTAGES USING A MODEL DEVELOPED BY MATLAB

I. Y. Ivanov

A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University
10, K. Marks st., Kazan, 420111

This paper describes a power system mathematical model developed by MATLAB for research on differential protection of transmission lines for 10-220 kV voltages.

Keywords: *line differential protection, saturation of current transformers, transient conditions, power system simulation tools.*