

На рис. 3 приведены фрагменты результатов экспериментальных испытаний средств адекватного моделирования ИЭС с ААС.

Выводы. 1. Рассмотренные принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени ИЭС с ААС позволяют в полной мере и на базе новейших достижений интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий осуществить концепцию адекватного моделирования ИЭС с ААС.

2. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность достижения полноты, достоверности и оперативности моделирования ИЭС с ААС, а также информационно-управляющих свойств и возможностей, необходимых для надежного и эффективного проектирования, исследования и эксплуатации ИЭС с ААС.

Авторы: **Боровиков Юрий Сергеевич** окончил факультет автоматики и электромеханики Томского политехнического университета (ТПУ) в 2000 г. В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию «Про-

граммно-аппаратные средства для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин» в ТПУ. Заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы» Энергетического института (ЭНИИ).

Гусев Александр Сергеевич окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Томского политехнического института (ТПИ) в 1973 г. В 2008 г. защитил докторскую диссертацию «Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем» в ТПУ. Профессор кафедры «Электроэнергетические системы» ЭНИИ ТПУ.

Сулайманов Алмаз Омурзакович окончил ЭЭФ ТПИ в 1991 г. В 2009 г. защитил кандидатскую диссертацию «Неактивная мощность и ее составляющие в электроэнергетических системах» в ТПУ. Доцент кафедры «Электроэнергетические системы» ЭНИИ ТПУ.

* * *

Анализ технической эффективности ступенчатых токовых защит и разработка рекомендаций для их настройки¹

ПРУТИК А.Ф., ШМОЙЛОВ А.В.

Проведен анализ токов коротких замыканий и ранее разработанного вероятностного алгоритма технической эффективности на структуре электрической сети, метрологически отраженной в виде сопротивления прямой последовательности. На основе данного анализа разработаны три варианта построения и настройки ступенчатых токовых релейных защит линий, отличающихся возможностью выбора уставки второй ступени из условия чувствительности.

Ключевые слова: электрическая сеть, релейная защита, техническая эффективность, вероятностные характеристики, отказ, срабатывание, излишнее действие, ложное действие

На протяжении ряда лет разрабатываются вероятностные подходы, алгоритмы и методы для задач электроэнергетики, в том числе для проектирования и настройки релейной защиты и автоматики [1, 2]. Последние основаны на работах Смирно-

Short-circuit currents and the previously developed probabilistic algorithm for estimating technical efficiency are analyzed on the structure of an electric network metrologically represented by a positive-sequence impedance. Three versions of the configuration and tuning of staged current protections of power lines differing from each other in the possibility of selecting the second-stage setting proceeding from the sensitivity condition are developed on the basis of this analysis.

Key words: electric circuit, relay protection, technical efficiency, probabilistic characteristics, failure, coming into action, unnecessary action, false operation

ва Э.П., Федосеева А.М., например [3], в связи с определением понятия эффективности релейной защиты (РЗ), развиты в [4, 5] и продолжают в настоящее время. В указанных материалах данное понятие уточнено как техническая эффективность РЗ и конкретизировано как разность потенциально возможного эффекта в виде вероятности коротких замыканий (КЗ) на защищаемом объекте $p(A)$, для устранения которого предназначена РЗ, и вероят-

¹ Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы.

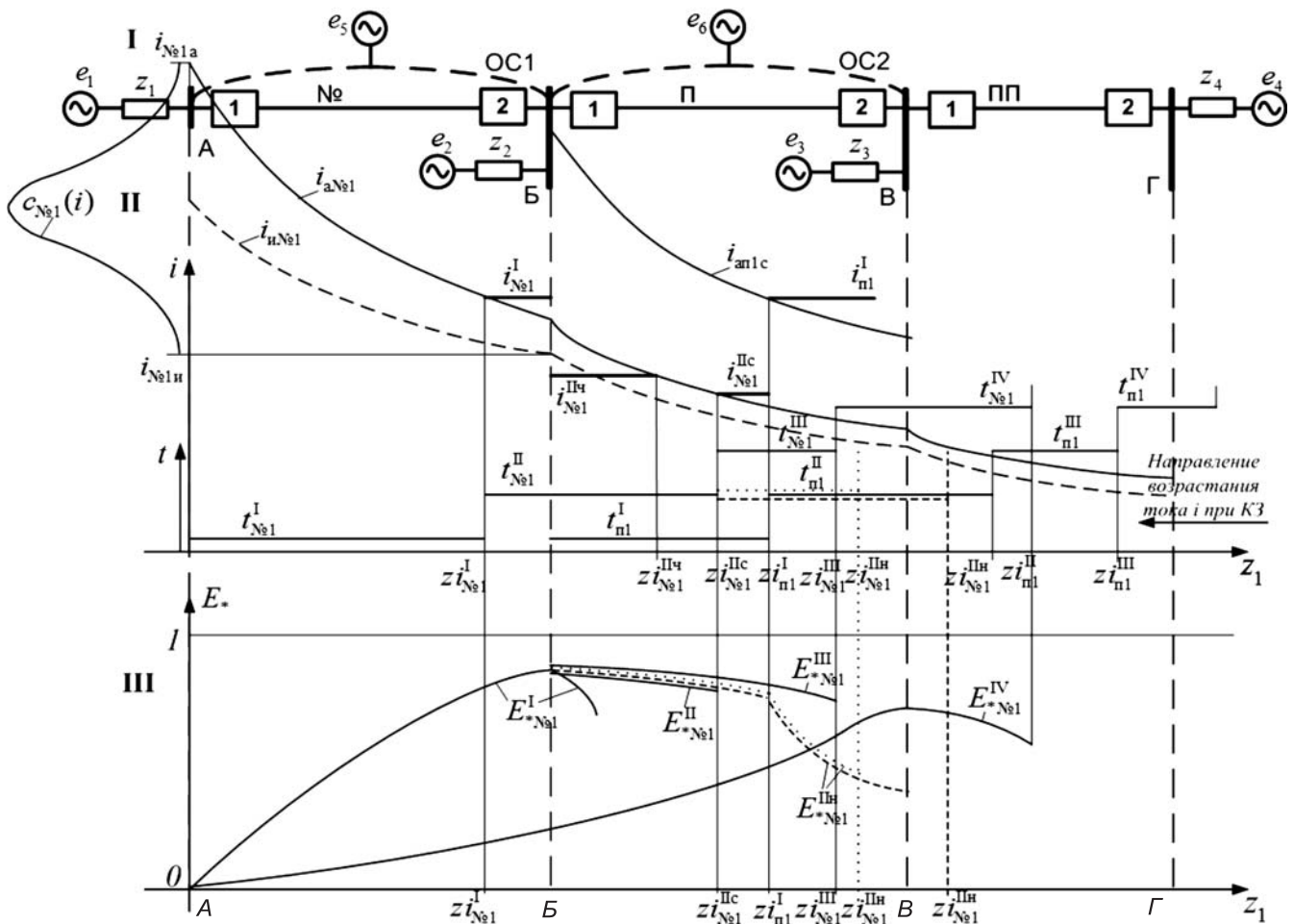
ности потерь $p(П)$, отнесенной к потенциально возможному эффекту $p(А)$. Данные потери в виде вероятностей отказов срабатывания $p(О)$ при КЗ на защищаемом объекте, излишних действий $p(И)$ при КЗ на внешних элементах электрической сети и ложных действий $p(Л)$ при отсутствии КЗ должны быть приведены к одним и тем же условиям учета. Ложные действия возможны в рабочих и ненормальных (асинхронных, неполнофазных режимах, бросках тока намагничивания) и их целесообразно рассматривать отдельно, чтобы ранжировать влияние на работу РЗ.

Как показал анализ, современные технические решения при построении аппаратуры РЗ с жестким выделением области действия (дифференциальные защиты, защиты линий с обменом информацией о срабатывании комплектов РЗ на концах) практически полностью устраняют данные потери. Наибольшим числом таких потерь обладают ступенчатые токовые и дистанционные защиты линий. Поэтому возникает целесообразность количественной оценки качества настройки каждой ступени, и такую возможность предоставляют разработанные

алгоритмы технической эффективности функционирования этой ступени. Отметим, что с помощью указанных алгоритмов возможны расчет технической эффективности как для заданной (например по экспертно-руководящему методу (ЭРМ)) уставки, так и определение оптимального значения последней, при которой достигается минимальная вероятность потерь $p(П)$.

Для расчетов технической эффективности кроме заданных уставок необходимы вероятностные характеристики, режимно-токовые отношения (коэффициенты токораспределения) для перевода электрических величин из собственных координат в координаты соседних предыдущих и смежных элементов сети. Поэтому необходима разработка программы обработки исходных данных и реализации алгоритмов. Такого рода сервисная интерактивная программа для ступенчатых токовых релейных защит сети средней сложности создана и апробирована.

Разработанная программа позволила стимулировать проведение структурно-режимного анализа параметров реагирования, уставок по ним и по



Фрагмент высоковольтной сети (I); токи КЗ вдоль линий и токовременные уставки (II) и техническая эффективность E_* для режимно-структурного анализа ступенчатых токовых релейных защит линий (III)

времени, технической эффективности при КЗ вдоль пространства защищаемой и внешних линий. Это пространство можно наглядно и однозначно отобразить сопротивлением прямой последовательности линий и трансформаторных элементов (см. рисунок).

Проведенный анализ и предложения по настройке ступенчатых токовых защит иллюстрируется рисунком, на котором обозначено: $I - A, B, B, \Gamma$ – подстанции сети; № – защищаемая линия; П – предыдущая линия; ПП предыдущая к предыдущей линии; $1, 2$ – выключатели на концах линий; $e_1 - e_6$ – источники; $z_1 - z_4$ – сопротивления источников; $OC1, OC2$ – обходные шунтирующие связи защищаемой и предыдущей линии соответственно;

Π – изменения токов (ось ординат i) через защиты $\text{№}1, \text{П}1, \text{ПП}1$ при КЗ вдоль линий сети (ось абсцисс – сопротивление прямой последовательности z_1) и временных характеристик (вторая ось ординат t) ступеней защит вдоль тех же линий при слабых обходных связях $OC1$ и $OC2$; i_c, i_a, i_u – токи – для согласования, максимальные и минимальные соответственно, через защиты $\text{№}1, \text{П}1$, обусловленные режимно-коммутационными состояниями сети; $i_{\text{№}1}, i_{\text{П}1}$ – уставки по току; $t_{\text{№}1}, t_{\text{П}1}$ – уставки по времени; $z_{\text{№}1}^i, z_{\text{П}1}^i$ – отображения уставок по току в координатах сопротивления прямой последовательности линий z_1 ; $I, \text{II}, \text{III}, \text{IV}$ – степень защиты (верхний индекс); «с» – верхний индекс уставок – выбор по условию согласования или селективности; «ч» – выбор по чувствительности; «н» обозначает характерные для короткой предыдущей линии П случаи, когда уставка второй ступени защиты $\text{№}1$ является более чувствительной, чем первая ступень защиты $\text{П}1$; $c_{\text{№}1}(t)$ – нормальная плотность распределения вероятностей токов КЗ на линии $\text{№}1$.

Кривые в зоне линии № представляют собой распределение тока КЗ в максимальном (индекс «а») и минимальном (индекс «и») режимах для комплекта РЗ1. Этим кривым соответствуют две кривые в зоне линии П и две кривые в зоне линии ПП , которые являются продолжением первых, так как найдены в тех же максимальном и минимальном режимах относительно защиты $\text{№}1$.

Сплошные линии – для ординарных случаев настройки ступеней защит; точки, штриховые линии – для случая переноса уставок ординарной настройки второй ступени защиты $\text{№}1$ на короткие предыдущие линии. В сети показаны только линии. Трансформаторы и автотрансформаторы исключены как принципиально не влияющие на рассматриваемые способы настройки.

Требование ЭРМ обеспечить селективность ступенчатых токовых защит обуславливает наличие отказов первой быстродействующей ступени при КЗ в области противоположного конца линии (такие отказы можно назвать отказами быстродействующего срабатывания), с которыми приходится мириться, чтобы не допустить излишние действия первой ступени при КЗ в начале внешних (предыдущих в направлении действия РЗ) элементов. В целом ЭРМ обеспечивает проектирование РЗ с преимущественным исключением излишних действий. Область быстродействующих отказов перекрывается более чувствительной, но медленнодействующей второй ступенью. При наличии предыдущих коротких линий или мощных трансформаторов (автотрансформаторов) вторые (третьи) ступени могут оказаться нечувствительными. В этом случае ЭРМ предлагает исключить из рассмотрения согласования с РЗ предыдущих коротких линий путем установки на последних защит с обменом информацией между комплектами аппаратуры по концам линий. С точки зрения технической эффективности наличие обменного канала для первых ступеней линий позволяет изменить уставки до значений, обеспечивающих гарантированную чувствительность при КЗ на всем пространстве линий и тем самым исключить потери быстродействующего срабатывания. Этот вариант РЗ целесообразно в дальнейшем назвать наилучшим, но дорогим из-за необходимости канала обмена. В связи с этим целесообразно рассмотреть другие менее дорогие варианты построения и настройки РЗ линии без канала обмена, но по свойствам, приближающимся в некоторой степени к наилучшему. Рассмотрение таких менее совершенных вариантов вполне возможно благодаря разработанному аппарату технической эффективности РЗ, позволяющему количественно оценивать качество канала РЗ.

Первый вариант – это намеренное первоначальное выставление значения уставки второй ступени по чувствительности с последующей проверкой уровня технической эффективности. Первая ступень при этом настраивается как обычно по ЭРМ. При такой настройке второй ступени возможны участки токов и соответствующих сопротивлений прямой последовательности предыдущих линий, при КЗ на пространстве которых возможны одновременные действия вторых ступеней защищаемой и предыдущих линий. Названные равновременные участки обуславливают потери излишних действий второй ступени защищаемой линии (которые являются причиной спада в правой части кривых $E_{*\text{№}1}^{\text{Пн}}$ на рисунке). Эти потери добавляются к потерям ложных действий данной ступени. Отка-

зов срабатывания у вторых ступеней, настроенных по чувствительности, нет. А потенциально возможным эффектом, как и для канала первой ступени, является вероятность КЗ на защищаемой линии.

Таким образом, преимуществом настройки второй ступени исходя из чувствительности является устранение многочисленных расчетов по отстройкам и согласованиям, особенно при большом числе предыдущих элементов в сложно-замкнутой сети, переводя эти расчеты из многочисленных и обязательных в менее многочисленные и желательные вероятности потерь излишних действий. Уточнение уставки данной ступени в сторону закругления с точки зрения требований ЭРМ невозможно, а в сторону чувствительности увеличивает участки одновременности вторых ступеней защищаемой и предыдущих линий и, следовательно, потери излишних действий второй ступени защищаемой линии. Анализ показывает, что при выборе уставок вторых ступеней исходя из чувствительности участки одновременности формируются на коротких предыдущих линиях, если на них предусмотрены ступенчатые РЗ. На соизмеримых по длине с защищаемой предыдущих линиях участки одновременности маловероятны.

На основании изложенного первый вариант настройки ступенчатых РЗ без канала обмена и уставкой второй ступени по чувствительности по сравнению с наилучшим вариантом наряду с потерями ложных действий имеет потери быстродействующего срабатывания первой ступени и потери излишних действий второй ступени на коротких предыдущих линиях с установленными ступенчатыми защитами, но при этом сохраняются преимущества устранения многочисленных расчетов, согласований и отстроек вторых ступеней при отсутствии канала обмена. Однако объективное решение по уставке может быть получено путем минимизации вероятности излишних действий второй ступени, что вполне может выполнить разработанная программа расчета технической эффективности.

Второй вариант построения и настройки ступенчатых РЗ без канала обмена определяется выставлением уставки второй ступени по чувствительности, а первой ступени — путем оптимизации технической эффективности с учетом всех составляющих потерь, включая метрологические. При этом экспертным или экономическим путем должно быть задано соотношение удельных весов между излишними и ложными действиями, с одной стороны, и отказами срабатывания, с другой. В данном варианте, как и в наилучшем, вторые ступени практически не будут иметь случаев отказов срабатывания и излишних действий, а первые ступени — отказов быстродействующего срабатывания.

Уставки резервирующих третьих (четвертых) ступеней по току согласно ЭРМ определяются независимо путем отстройки от рабочих токов, а время действия этих ступеней по встречно-ступенчатому принципу, который в случае усложненной с многократным питанием сети не позволяет однозначно выбрать уставки по времени. Поэтому возникают участки одновременных действий резервных ступеней на пространстве предыдущих к предыдущим линиях или линиях второй периферии и, как следствие, излишние действия. Уставки этих ступеней по параметру реагирования могут быть уточнены путем минимизации излишних действий, если уставка резервирующей ступени защищаемой линии размещается на пространстве всех линий второй периферии. В противном случае, когда уставка резервирующей ступени защищаемой линии попадает на пространство предыдущих линий, т.е. имеют место отказы интересующей ступени в области резервирования, названное уточнение необходимо проводить с помощью полного критерия технической эффективности.

Выводы. 1. Использование разработанных алгоритмов и программы определения технической эффективности РЗ позволяют количественно объективно оценить качество каналов ступенчатых токовых РЗ при различном их построении и настройке.

2. Совместный анализ изменений режимного параметра реагирования (тока) и технической эффективности в структуре электрической сети, отраженной в виде сопротивлений прямой последовательности, дал возможность выявить и предложить новые варианты построения и настройки ступенчатых токовых РЗ линий: на основе использования наилучшего варианта с каналом обмена информацией между комплектами на концах каждой линии и с уставкой второй ступени исходя из чувствительности; также двух вариантов без использования обменного канала: с оптимальной настройкой второй ступени, исходя из минимума потерь излишних действий и с оптимальной настройкой первой ступени, исходя из максимума технической эффективности с учетом соотношения между удельными весами отказов срабатывания и излишних действий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмойлов А.В., Стародубцева С.А., Князева Н.В., Богданова О.Н. Применение коэффициента взаимосвязи для анализа чувствительности и селективности устройств релейной защиты и автоматики. — Электричество, 2004, № 3.
2. Шмойлов А.В., Кривова Л.В., Стоянов Е.И., Игнатьев К.В. Вероятностный метод селекции границ интервалов данных для задач электроэнергетики. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2008, № 7 — 8/1.

3. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

4. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Алгоритм оценки технической эффективности средств релейной защиты и автоматики: — Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2009, Спец. Вып. №1.

5. Прутик А.Ф., Шмойлов А.В. Разработка алгоритмов программ для настройки и оценки технической эффективности релейной защиты. — Электричество, 2009, № 12.

Авторы: Прутик Алексей Федорович окончил электроэнергетическое отделение ТПУ в 2009 г. Аспирант, ассистент кафедры электроэнергетических сетей и систем ТПУ.

Шмойлов Анатолий Васильевич окончил электроэнергетический факультет ТПИ в 1962 г. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и применение низкочастотных параметрических генераторов в релейной защите». Доцент кафедры электроэнергетических сетей и систем ТПУ.