

**Авторы:**

Иванова О.М.,  
Ильин Д.В.,  
Бычков А.В.,  
к.т.н. Дони Н.А.,  
ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары, Россия.

Ivanova O.M.,  
Ilyin D.V.,  
Bychkov A.V.,  
Ph.D. Doni N.A.,  
EKRA Research and  
Production Enterprise  
LTD,  
Cheboksary, Russia.

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА RTDS ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОРГАНА КОНТРОЛЯ ПОГАСАНИЯ ДУГИ

## THE EXPERIENCE OF DEVELOPMENT OF ARC EXTINCTION CONTROL MEASUREMENT DEVICE WITH RTDS

Аннотация: разработка измерительного органа контроля погасания дуги, предназначенного для использования в устройствах автоматики повторного включения на воздушных линиях высоких и сверхвысоких напряжений с шунтирующими реакторами, при помощи программно-аппаратного комплекса моделирования в реальном времени Real-Time Digital Simulator (RTDS).

Ключевые слова: однофазное автоматическое повторное включение, орган контроля погасания дуги, Real-Time Digital Simulator.

**Abstract:** the development of arc extinction control function to use in single-phase reclosing for high and ultra-high voltage power lines with shunt reactors using Real-Time Digital Simulator.

**Keywords:** single-phase reclosing, arc extinction control function, Real-Time Digital Simulator.

Основные способы определения факта погасания дуги строятся на анализе напряжения в отключенной фазе воздушной линии (ВЛ). Известны измерительные органы (ИО), реагирующие на модуль напряжения отключенной фазы, угол напряжения и частоту напряжения отключенной фазы.

Цикл однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) подразумевает, что фаза с коротким замыканием (КЗ) отключена с двух сторон, но из-за наличия электростатических связей через поперечные проводимости и электромагнитного взаимодействия с неотключенными фазами в поврежденной фазе присутствует напряжение. Повторное включение должно быть произведено после погасания дуги, иначе ОАПВ будет неуспешным и произойдет трехфазное отключение ВЛ от сети.

Воздействие электрической дуги на элементы линий электропередачи практически сводится к перегосу проводов и ожогу изоляторов. Следует по возможности уменьшать продолжительность КЗ и время повторного включения, для того чтобы сократить до минимума опасность нарушения режима работы энергосистемы и уменьшить вероятность перегоса проводов дуги КЗ [1].

Время горения дуги подпитки и минимальная пауза ОАПВ определяются током подпитки и восстанавливаемым напряжением на отключенной фазе. Кроме этого

влиять могут такие факторы, как величина и длительность протекания тока КЗ, номинальное напряжение линии, скорость ветра.

На осциллограммах фазного напряжения, представленных на рис. 1, можно наблюдать просадку напряжения во время КЗ, отключение выключателей и непосредственно сам момент погасания дуги, дальнейшее восстановление напряжения. После гашения дуги подпитки при отключении КЗ с двух сторон поврежденной фазы на линии с шунтирующими реакторами (ШР) начинается восстановление напряжения в форме биений (рис. 1). Это обусловлено наложением на наведенное неповрежденными фазами напряжение колебательного процесса, обусловленного энергией, запасенной элементами схемы к моменту гашения дуги подпитки [1].

Погасание дуги не всегда бывает успешным. В теории, открытая дуга подпитки в установках высокого напряжения продолжает гореть пока дуговой столб, растягиваясь, не увеличит свое сопротивление до критического значения, при котором тепловая энергия, отдаваемая дугой в окружающую среду, не станет больше, чем энергия от подпитки через неповрежденные фазы. Таким образом, в замкнутом контуре с током подпитки нарушается баланс энергий.

Сопротивление дуги нелинейное и помимо многих факторов зависит еще и от мгновенного значения тока. Чем ближе



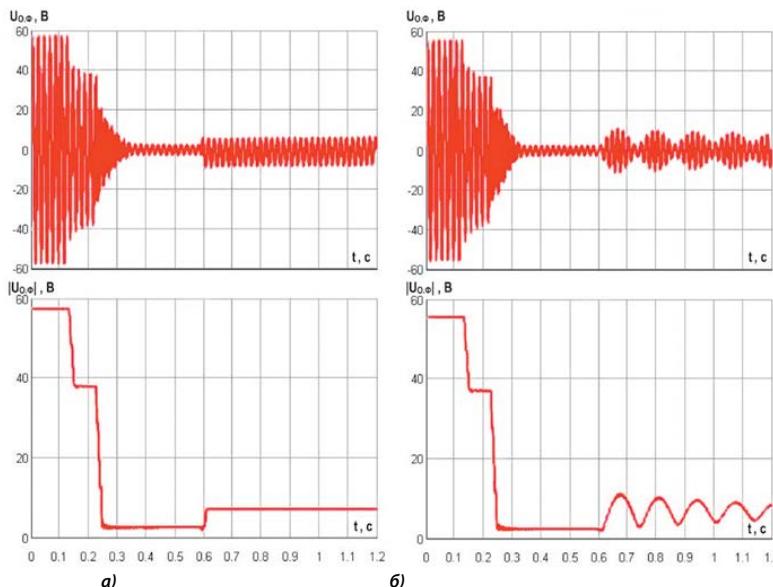
**Иванова  
Ольга Максимовна**

Дата рождения: 24.10.1994 г.  
В 2018 г. окончила магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Автоматика энергосистем».  
Инженер 3 категории отдела СРЗиА ООО НПП «ЭКРА».



**Ильин  
Дмитрий Владимирович**

Дата рождения: 07.01.1987 г.  
В 2009 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».  
Инженер 1 категории отдела СРЗиА ООО НПП «ЭКРА».



**Рис. 1.** Осциллограммы мгновенного значения и модуля первой гармоники напряжения отключенной фазы при погасании дуги на 600 мс (через 350 мс после отключения фазы): а) – на ВЛ без ШР, б) – на ВЛ с ШР

мгновенное значение к нулю, тем больше сопротивление дугового промежутка и тем больше вероятность гашения. Наличие аperiodической составляющей в токе подпитки ухудшает условия гашения, не давая сопротивлению увеличиться до критического значения.

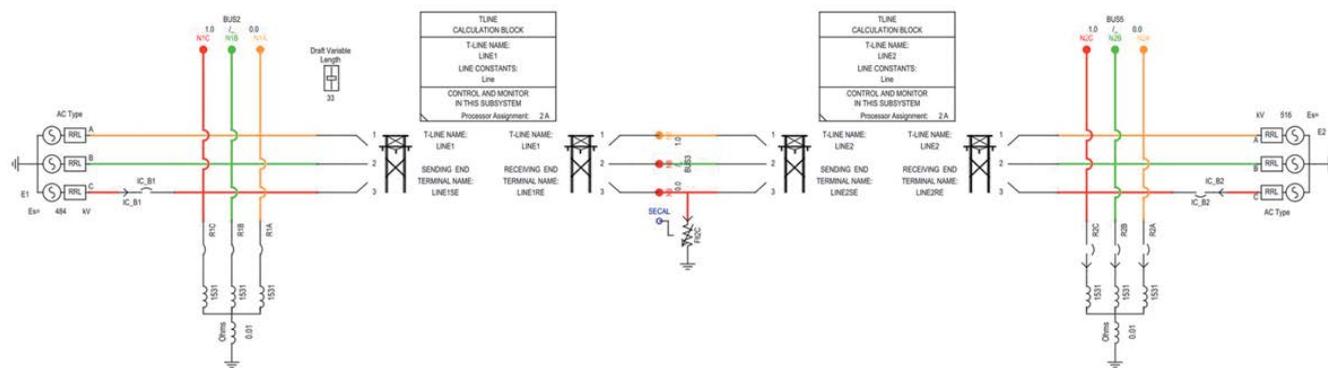
Согласно опытным данным [2] повторный пробой дугового промежутка происходит преимущественно в первые 20 мс после погасания, пока воздушная среда не успела деионизироваться. Время полной деионизации принято равным 200 мс, после это

го повторный пробой считается маловероятным.

Моделирование процессов производилось с помощью программно-аппаратного комплекса RTDS (ПАК RTDS). В программном обеспечении RSCAD для управления симулятором RTDS создана модель электроэнергетического объекта для исследований измерительного органа контроля погасания дуги (ОКПД). В состав модели,

приведенной на рис. 2, входит ВЛ электропередачи с двухсторонним питанием номинальным напряжением 500 кВ с шунтирующими реакторами. Общая длина ВЛ равна 430 км. Параметры модели линии эквивалентны параметрам реальной ВЛ 500 кВ «Ростовская АЭС – Буденновск».

Для исследования дуговых замыканий в литературе часто используются модели электрической дуги, основанные на балансе энергий в столбе дуги [3, 4]. В данной работе для исследования дуговых замыканий на различных расстояниях линии была использована встроенная в RSCAD модель дуги [5]. Эта модель описывает поведение дуги на основе дифференциальных уравнений. Дуга, возникающая в первый момент времени КЗ, и дуга после коммутации мо-



**Рис. 2.** Модель электроэнергетического объекта для исследований



**Бычков**

**Анатолий Владимирович**

Дата рождения: 07.08.1984 г.  
В 2007 г. окончил магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов ЧГУ им. И.Н. Ульянова.  
Руководитель группы отдела СРЗиА ООО НПП «ЭКРА».



**Дони**

**Николай Анатольевич**

Дата рождения: 26.10.1946 г.  
Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1969 г. В 1981 г. во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 150 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки электроэнергетических сигналов.  
Директор по науке – заведующий отделом СРЗиА ООО НПП «ЭКРА».

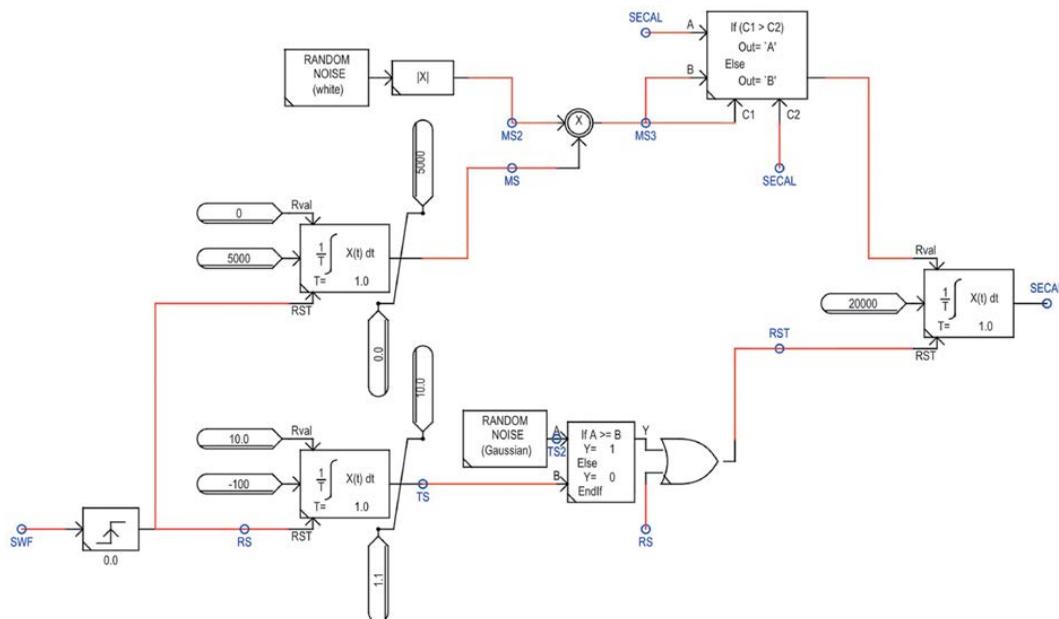


Рис. 3. Моделирование параметров дуги

делируются одинаково. При этом для каждого случая изменяются только константы, связанные с постоянной времени дуги. Дополнительно задается длина дуги и скорость её изменения при повторном пробое. На рис. 3 сигнал SWF используется для начала моделирования повреждения на линии и последующего процесса горения дуги. Сигнал SECAL - выходной сигнал схемы регулирования длины дуги, амплитуда которого пилообразно увеличивается до критического значения, приводящего к гашению дуги. Пилообразность обеспечивает промежуточные неуспешные попытки гашения. Этот элемент управления моделируемой схемы соответствует реальным процессам горения дуги.

На рис. 4 представлена осциллограмма напряжения при повторном пробое. Рассмотрите

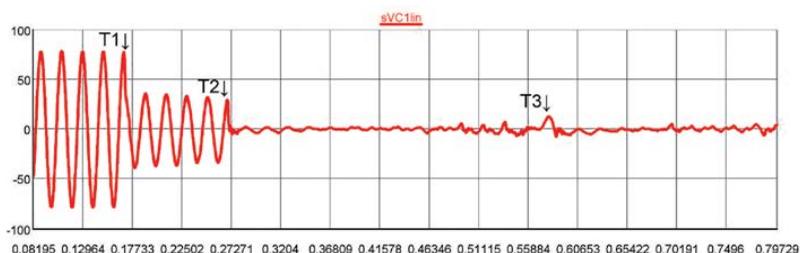


Рис. 4. Осциллограмма напряжения с повторным пробоем

более подробно происходящие процессы. Момент времени  $T1$  – момент КЗ,  $T2$  – отключение выключателей,  $T3$  – неуспешная попытка гашения дуги и повторный пробой.

Для экспериментальной проверки работы измерительного ОКПД и обработки осциллограмм повреждений для дальнейшего исследования использовалась программная среда RSCAD.

На начальных этапах разработки ПАК RTDS позволяет производить создание моделей цифровых ИО без совместного использования с устройством релейной защиты (РЗ), а также быстро корректировать алгоритмы ИО, логику работы и структуру защиты в целом.

Проверка правильности настройки схемы замещения ВЛ производилась путем сравнения осциллограмм в формате comtrade, полученных на модели, с осциллограммами, записанными на ВЛ 500 кВ.

Принцип действия измерительного ОКПД – определение приращения вектора первой гармоники напряжения отключенной фазы за

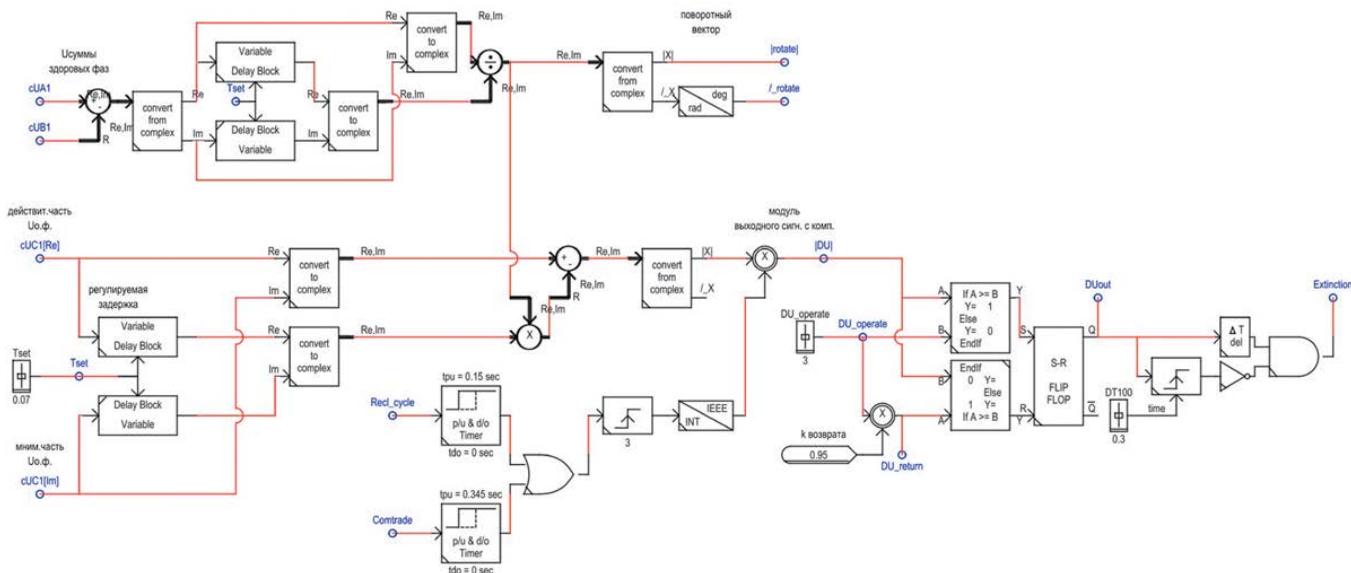


Рис. 5. Поясняющая схема работы модели измерительного ОКПД

время равно половине уставки по периоду биений [6]. Поясняющая схема работы измерительного ОКПД представлена на рис. 5.

Для определения приращения используются два отсчета, измеренные в разные моменты времени. На выходе ИО теоретически получится нулевое значение в период времени горения дуги. В режиме восстановления напряжения разница будет максимальной.

На рис. 6 представлена осциллограмма напряжения отключенной фазы, где  $T3.1, T3.2, T3.3$  – неуспешные попытки гашения дуги и повторный пробой,  $T4$  – успешное гашение дуги и восстановление напряжения. Моделирование дуги производилось с помощью ПАК RTDS. Приведен так же дискретный сигнал срабатывания измерительного ОКПД (DUout). Выходной дискретный сигнал срабатывания (Extinction), действующий в логическую схему включения от устройства ОАПВ, про-

ходит через выдержку времени после окончательного гашения дуги. Измерительный ОКПД зафиксировал три неудачные попытки гашения дуги и одну удачную. Факт погасания дуги определен верно. После гашения дуги подпитки восстановление напряжения происходит с биениями, обусловленными колебательным процессом разряда энергии, запасенной к моменту гашения дуги подпитки элементами схемы.

На рис. 7 представлен пример результата работы ИО при подаче осциллограммы, записанной на ВЛ 500 кВ. Она по характеру процесса схожа с осциллограммой (рис. 6), полученной на модели RSCAD. Таким образом можно говорить о соответствии модели RSCAD реальному объекту. На данной осциллограмме обозначена одна неуспешная попытка гашения дуги  $T3$  и в момент времени  $T4$  успешное гашение дуги с последующим восстановлением напряжения. Об успешности гашения дуги

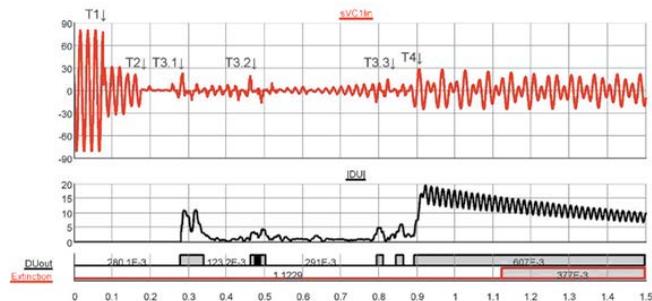


Рис. 6. Анализ работы ОКПД (осциллограмма, записанная при моделировании дуги с помощью ПАК RTDS)

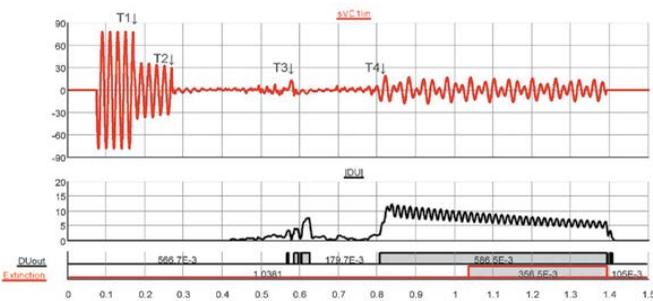


Рис. 7. Анализ работы ПО контроля погасания дуги (осциллограмма, записанная на ВЛ 500 кВ)

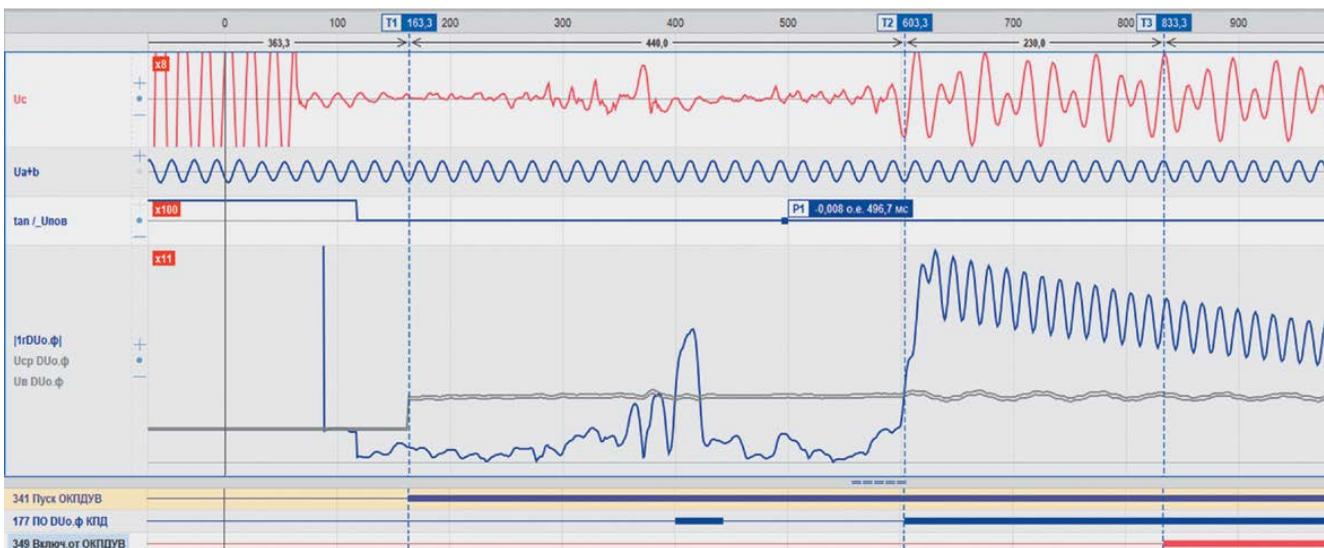


Рис. 8. Анализ работы устройства

можно судить по модулю напряжения  $|DU|$  и выходному сигналу (Extinction), который возникает через выдержку времени деионизации среды после устойчивого гашения дуги. Сигнал (Extinction) указывает на окончательное гашение дуги. Время деионизации среды характеризует время, после которого дуговой промежуток способен выдержать максимальное восстанавливающееся напряжение, а значит обеспечить успешное повторное включение линии. Факт погасания дуги определен верно.

На рис. 8 представлена работа устройства контроля погасания дуги при подаче сигналов, соответствующих той же осциллограмме, записанной на ВЛ 500 кВ. В момент времени  $T1$  появляется дискретный сигнал 341, который разрешает работу устройства ОКПД. Дискретный сигнал 177 – это сигнал срабатывания измерительного ОКПД. Сигнал 349 – выходной сигнал срабатывания логики контроля погасания дуги, действующий на включение выключателя. Факт погасания дуги также определен верно.

На заключительных этапах разработки нового устройства ПАК RTDS позволяет оперативно подключать/отключать реальное устройство без изменения модели энергосистемы и сравнивать его работу с работой модели. В результате сокращается время разработки нового устройства.

### Выводы

1. Для повышения надежности выявления факта погасания дуги в цикле ОАПВ был разработан и экспериментально исследован измерительный ОКПД.
2. На начальных стадиях разработки нового устройства ОКПД средства ПАК RTDS позволяют создать его ал-

горитмическую модель и быстро вносить коррективы в алгоритмы работы по текущим результатам анализа.

3. На стадии финального тестирования работы устройства ОКПД комплекс RTDS позволяет в реальном времени проводить испытания микропроцессорного терминала РЗ с функцией ОАПВ и осуществлять сравнение результатов работы реального устройства с результатами, полученными на основе его алгоритмической модели.

4. Анализ результатов испытаний устройства ОКПД подтверждает надежное определение момента погасания дуги в цикле успешного ОАПВ.

### Литература:

1. Майкопар А.С. Дуговые замыкания на линиях электропередачи. М.- Л.: Энергия, 1965. – 200 с.
2. Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др.; Под ред. Левинштейна М.Л. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
3. M. Kizilcay, T. Priok. Digital Simulation of Fault Arcs in Power Systems. ETEP Journal, vol., 1, no.1, pp. 55-60, 1991.
4. Титов И.Т. Учёт влияния открытой электрической дуги на параметры срабатывания дистанционной защиты. / И.Т. Титов, А.В. Бычков, Н.А. Дони // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева - Нижний Новгород. - 2020. - №2 (129) – С. XX - XX.
5. J. Giesbrecht, D.S. Ouellette and C.F. Henville. Secondary Arc Extinction and Detection Real and Simulated, 2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008), Glasgow, 2008, pp. 138-143.
6. Патент РФ № 2695890 С1. Способ контроля состояния отключенной в цикле ОАПВ фазы линии электропередачи с шунтирующими реакторами и устройство для его осуществления. // Дони Н.А., Ильин Д.В., Бычков А.В. – Оubl. 30.07.2019. Бюл. № 22.
7. Ильин Д.В. Повышение надёжности определения факта погасания дуги в цикле ОАПВ / Д.В. Ильин, А.В. Бычков, Н.А. Дони // Энергетик. – 2019. – №11. – С. 9-13.