

Авторы:

к.т.н. Ефремов В.А.^{1,2},
Ефремов А.В.^{1,2},
Таньгин С.А.^{1,2},

¹ ООО «Релематика»,

² ЧГУ им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия.

Ph.D. Efremov V.A.^{1,2},
Efremov A.V.^{1,2},
Tanygin S.A.^{1,2},

¹ Relematika LLC,

² Chuvash State University,
Cheboksary, Russia.

АДАПТИВНЫЕ УСТАВКИ ДЛЯ РЕЛЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

ADAPTIVE SETTINGS FOR CURRENT AND VOLTAGE RELAYS

Аннотация: в статье рассмотрен способ формирования адаптивных уставок для релейных защит с одной подведенной величиной. На примере максимальной токовой защиты пояснен алгоритм расчета адаптивных уставок для всех ступеней защиты. Показана возможность применения для микропроцессорных защит адаптивных уставок и их расчет в реальном масштабе времени непосредственно в устройстве защиты.

Ключевые слова: релейная защита, параметр срабатывания, адаптивная уставка, аварийные составляющие.

Abstract: the article considers the method of forming adaptive settings for relay protection with one input value. The algorithm for calculating adaptive settings for all protection stages is explained using the example of overcurrent protection. The article shows the possibility of using adaptive settings for microprocessor protection and their real-time calculation directly in the protection device.

Keywords: relay protection, operation parameter, adaptive setting, emergency components.

В настоящее время ведется активная работа по созданию методик расчета параметров срабатывания (уставок) релейной защиты и автоматики (РЗА). Основная тенденция направлена на формирование адаптивных уставок срабатывания. Под адаптацией в РЗА понимается способность формирования уставки срабатывания по параметрам доаварийного нагрузочного режима [1].

В концепции развития электросетевого комплекса [2] отмечается, что «расчет параметров РЗА выполняется по принципам, заложенным в электромеханических комплексах РЗА» и «есть необходимость переосмыслить подходы к расчетам параметров РЗА».

Одно из направлений цифровизации электросетевого комплекса – это автоматизация процесса расчета токов короткого замыкания (КЗ) и параметров срабатывания [2]. Главная цель такой автоматизации – увеличение чувствительности защит, которое может быть получено за счет постоянного расчета текущего нагрузочного режима, а также учета конфигурации сети в момент возникновения аварии. Побочным положительным эффектом такого подхода можно назвать и снижение количества ошибочных расчетов за счет исключения «человеческого фактора» из процесса расчета.

В самом процессе формирования адаптивных уставок РЗА можно выделить два подхода:

- полная автоматизация расчетов сети на внешнем сервере и формирование

на их основе уставок защит для автоматической их записи в устройства РЗА. Наличие информационных связей между подстанциями (ПС) и отдельными элементами электрической системы позволяет поднять эффективность таких расчетов, например, при реконфигурировании системы или после аварийных коммутаций в ней [3];

- расчет уставок на базе получаемых текущих величин тока и напряжения непосредственно в терминале защиты.

Следует отметить, что процесс расчета в алгоритмах первого подхода производится специальными вычислительными серверами вне устройства защиты, что весьма затрудняет получение текущих уставок в реальном масштабе времени при изменении параметров режима сети. К тому же наличие линии связи между вычислительным сервером и устройством (терминалом) защиты предполагает обеспечение надежности передачи информации путем построения территориально иного резервного канала связи, а также исключение влияния помех на эти каналы при коммутациях электрооборудования и возможности несанкционированного доступа на вычислительный сервер или терминал защиты через них.

В предлагаемой статье рассматривается второй подход к формированию адаптивных уставок. Он заключается в том, что в качестве информационных параметров используются текущие и предшествующие моменту расчета значения фазных токов и напряжений, их симметричные и аварий-

ные составляющие [4], источником которых являются параметры предшествующего режима с места повреждения.

Для РЗА с одной подведенной величиной предполагается минимальное количество расчетов, а формирование новых уставок должно происходить практически мгновенно после смены режима сети, например, при отключении части энергосистемы в случае аварии. В отличие от описанного в [3] подхода рассматриваемый метод формирования уставок не зависит от состояния информационной сети, что может оказаться определяющим фактором с учетом возникающих помех в сети во время коммутаций выключателей на ПС.

Алгоритм расчета адаптивной уставки по предлагаемому методу позволяет по параметрам текущего $\underline{U}_v, \underline{I}_v$ и предшествующего (нагрузочного) $\underline{U}_{v\text{пред}}, \underline{I}_{v\text{пред}}$ режимов определять аварийные составляющие напряжений и токов фаз:

$$\underline{U}_v^{\text{ав}} = \underline{U}_v - \underline{U}_{v\text{пред}}, \quad (1a)$$

$$\underline{I}_v^{\text{ав}} = \underline{I}_v - \underline{I}_{v\text{пред}}, \quad (1b)$$

где $v=A, B, C$.

По величинам $\underline{U}_v, \underline{I}_v$ и $\underline{U}_{v\text{пред}}, \underline{I}_{v\text{пред}}$ определяются также симметричные составляющие текущего $\underline{U}_z, \underline{I}_z$ и предшествующего $\underline{U}_{z\text{пред}}, \underline{I}_{z\text{пред}}$ режимов, и на их основе рассчитываются аварийные симметричные составляющие напряжений и токов:

$$\underline{U}_z^{\text{ав}} = \underline{U}_z - \underline{U}_{z\text{пред}}, \quad (2a)$$

$$\underline{I}_z^{\text{ав}} = \underline{I}_z - \underline{I}_{z\text{пред}}, \quad (2b)$$

где $z=1, 2, 0$.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма формирования адаптивной уставки для реле тока и напряжения, в котором из мгновенных величин токов i_v и напряжений u_v посредством фильтра ортогональных составляющих (ФОС) вычисляются комплексные значения фазных токов \underline{I}_v и напряжений \underline{U}_v .

Полученные значения \underline{I}_v и \underline{U}_v служат базой для текущей адаптивной уставки, запоминаются в модуле памяти как величины предшествующего режима ($\underline{U}_{v\text{пред}}, \underline{I}_{v\text{пред}}$) и поступают на фильтр симметричных составляющих (ФСС) для формирования текущих значений величин прямой, обратной и нулевой последовательностей токов \underline{I}_z и напряжений \underline{U}_z .

При формировании адаптивных уставок по симметричным составляющим величины $\underline{U}_z, \underline{I}_z$, как и фазные значения, запоминаются в модуле памяти как величины предшествующего режима ($\underline{U}_{z\text{пред}}, \underline{I}_{z\text{пред}}$) и поступают на фильтр аварийных составляющих (ФАС) для формирования текущих аварийных составляющих величин прямой, обратной и нулевой последовательностей токов $\underline{I}_z^{\text{ав}}$ и напряжений $\underline{U}_z^{\text{ав}}$. Отстроенный от небалансов выходной сигнал ФАС является селектором изменения режима и служит пусковым органом (ПО на блок-схеме рис. 1) для формирования адаптивной уставки. Одновременно текущие значения фазных величин и их симметричные составляющие запоминаются в модуле памяти в качестве величин предшествующего режима для формирования адаптивной уставки при следующем изменении режима.

Следует заметить, что данный метод позволяет непосредственно в момент перехода одного режима в другой формировать адаптивные уставки для фазных величин, например, максимальной токовой защиты (МТЗ) и/или для токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП), реле тока обратной (РТОП) или прямой (РТПП) последовательностей.

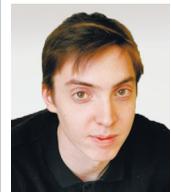
Определяющую роль в получении адаптивной уставки играют аварийные состав-



Ефремов

Валерий Александрович

В 1981 г. окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова по специальности «Электроснабжение». В 1993 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском политехническом институте на тему «Адаптивный дистанционный принцип в защите линий электропередачи». Заместитель исполнительного директора по техническим вопросам ООО «Релематика». Доцент кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова.



Ефремов

Алексей Валерьевич

В 2019 г. окончил магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю «Автоматика энергосистем» факультета «Энергетика и электротехника». Инженер департамента стратегического развития ООО «Релематика». Аспирант кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

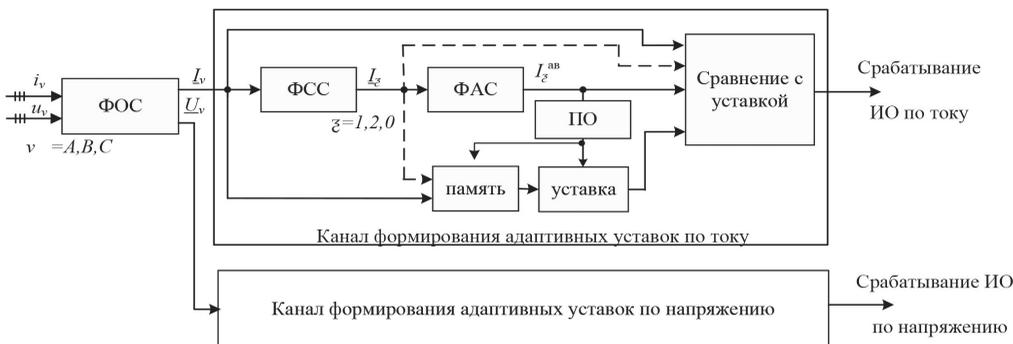


Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования адаптивной уставки для реле с одной подведенной величиной



Таньгин
Степан Александрович
 В 2016 г. окончил магистратуру ЧГУ им. И.Н. Ульянова по профилю «Автоматика энергосистем» факультета «Энергетика и электротехника». Заведующий сектором защит высокого напряжения ООО «Релематика». Аспирант кафедры ТОЭ и РЗА ЧГУ им. И.Н. Ульянова.

ляющие. На практике при несимметричных повреждениях следует применять составляющие обратной последовательности, которые, в отличие от составляющих прямой последовательности, не содержат токов от источников электроэнергии, в т. ч. при срабатывании быстродействующих регуляторов на станциях (регуляторы сильного действия). Уставки аварийных симметричных составляющих обратной и нулевой последовательности отстраиваются от возникающих в измерительных цепях устройства небалансов в режимах максимальной нагрузки и рассчитываются по классическим формулам [5, 6]. Например, адаптивная уставка для пускового органа по току обратной последовательности (рис. 1) или для РТОП:

$$I_{2\text{уст}}^{\text{аб}} \geq I_{2\text{уст}}^{\text{аб}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} (I_{2\text{нб}} + I_{2\text{нс}}) = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} (k_{\text{нб}} I_{\text{м пред}}), \quad (3)$$

где $I_{2\text{уст}}^{\text{аб}}$ – текущее значение аварийной составляющей тока обратной последовательности;

$I_{2\text{уст}}^{\text{аб}}$ – адаптивная уставка аварийной составляющей тока обратной последовательности в момент изменения режима;

$k_{\text{отс}} = 1,2$ – коэффициент отстройки;

$k_{\text{в}} = 0,95$ – коэффициент возврата реле;

$I_{2\text{нб}} = k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{м пред}}$ – ток небаланса обратной последовательности, сформированный по результатам измерения предшествующего режима. Возможно использование неадаптивной уставки, рассчитанной по токам максимального нагрузочного режима:

$$I_{2\text{нб}} = k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{раб, макс}}$$

$I_{\text{м пред}} = \max[\text{mod}(\underline{I}_{\text{А пред}}), \text{mod}(\underline{I}_{\text{В пред}}), \text{mod}(\underline{I}_{\text{С пред}})]$ – максимальное значение фазных токов;

$k_{\text{нб}} = 0,05$ – коэффициент небаланса;

$I_{2\text{нс}} = 0$ – в аварийной составляющей отсутствует величина, обусловленная несимметрией предшествующего (нагрузочного) режима.

Особенность аварийных составляющих в том, что измерительные органы (ИО) на их основе срабатывают как при набросе тока, так и при его снижении, например, при отключении КЗ. Поэтому ИО на базе аварийных составляющих всегда должен контролироваться дополнительным ИО обратной последовательности, уставка которого определяется величиной небаланса, рассчитанной по максимальному току нагрузки:

$$I_{2\text{тек}} \geq I_{2\text{уст}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} (I_{2\text{нб}} + I_{2\text{нс}}) = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} (k_{\text{нб}} + k_{\text{нс}}) I_{\text{м пред}} = 1,2/0,95 \cdot \sqrt{0,05^2 + 0,03^2} \cdot I_{\text{м пред}} \approx 0,058 I_{\text{м пред}}, \quad (4)$$

где коэффициенты для расчета формулы (4) приняты равными коэффициентам формулы (3);

$k_{\text{нс}} = 0,03$ – коэффициент несимметрии предшествующего режима.

Срабатывание РТОП будет происходить при следующих условиях:

$$\Omega(I_2) = \begin{cases} 1, & (I_2^{\text{аб}} \geq I_{2\text{уст}}^{\text{аб}} \ \& \ I_{2\text{тек}} \geq I_{2\text{уст}}) \\ 0, & (I_2^{\text{аб}} < I_{2\text{уст}}^{\text{аб}} \ \vee \ I_{2\text{тек}} < I_{2\text{уст}}) \end{cases}, \quad (5)$$

где Ω – математическая ступенчатая (скачкообразная) функция.

Формирующаяся в канале тока (рис. 1) адаптивная уставка для токовых ИО, реагирующих на фазные величины $I_{\text{ф уст}}$, МТЗ или ИО, реагирующий на составляющие прямой последовательности $I_{1\text{уст}}$, будут определяться по величинам режима, предшествующего текущему моменту:

$$I_{\text{ф уст}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{м пред}}, \quad (6a)$$

$$I_{1\text{уст}} = K_{\text{отс}} \cdot I_{1\text{ пред}}, \quad (6b)$$

где $I_{\text{м пред}} = \max[\text{mod}(\underline{I}_{\text{А пред}}), \text{mod}(\underline{I}_{\text{В пред}}), \text{mod}(\underline{I}_{\text{С пред}})]$, $I_{1\text{ пред}} = \text{mod}(\underline{I}_{1\text{ пред}})$ – соответственно максимальные действующие значения фазных токов и значение тока прямой последовательности;

$K_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки; рекомендуется в зависимости от величины коммутируемой нагрузки и от номера ступени защиты принимать равным $K_{\text{отс}} = 1,2 + 2,0$.

Формула (6b) может быть использована и для формирования уставок срабатывания токовых ИО, реагирующих на составляющие обратной и нулевой последовательностей.

Полученная адаптивная уставка сравнивается с текущей величиной. Например, срабатывание фазных ИО будет описано формулой:

$$\Omega(I_{\text{ф уст}}) = \begin{cases} 1, & I_{\text{ф уст}} < \max[\text{mod}(\underline{I}_{\text{в}})] \\ 0, & I_{\text{ф уст}} \geq \max[\text{mod}(\underline{I}_{\text{в}})] \end{cases}, \quad (7)$$

где $\max[\text{mod}(\underline{I}_{\text{в}})]$ – модуль максимального текущего значения фазных токов.

На практике следует всегда учитывать вероятность формирования адаптивной уставки от малых величин токов. Поэтому адаптивная уставка должна превышать некую минимальную уставку, которая может быть рассчитана по величинам нагрузочного режима или по току КЗ в минимальном режиме: $I_{\text{ф уст}} \geq \min[\text{mod}(\underline{I}_{\text{в}})]$.

Такой подход к формированию адаптивной уставки позволяет получить максимальную чувствительность для одной, обычно 1-й ступени МТЗ. В отличие от классической 1-й ступени МТЗ – токовой отсечки – 1-я ступень МТЗ с адаптивной уставкой всегда будет охватывать значительную длину линии, что снимает проблему целесообразности ее применения.

По мере развития и внедрения защит на базе адаптивных алгоритмов все острее встает вопрос об их применимости в ступенчатых защитах для реализации 2-х и 3-х ступеней [7]. Рассмотрим эту проблему для целей применения адаптивных уставок в МТЗ. Адаптивные уставки позволяют получить максимальную чувствительность для защиты, но не определяют зоны действия ступеней. Для решения этой проблемы в реальном масштабе времени предлагается применить стандартную методику определения зон действия ступеней путем расчета токов КЗ.

Для формирования токового реле с адаптивной уставкой, которое защищает всю линию целиком (2-я ступень МТЗ) и резервирует защиту смежной ПС (3-я ступень МТЗ) предлагается дополнить алгоритм расчетами величин аварийного тока при трехфазном КЗ ($K^{(3)}$) на шинах смежной ПС (зона действия 1-й ступени) и на 0,6 длины смежной линии или на стороне СН (ВН) самого мощного трансформатора на шинах смежной ПС (зона действия 2-й ступени МТЗ). Такие расчеты возможны при условии определения постоянно меняющихся величин эквивалентных сопротивлений последовательностей и эквивалентной электродвижущей силы (ЭДС) прямой последовательности относительно входов устройства защиты (эквиваленты «за спиной»).

На рис. 2 приведена методика определения таких эквивалентов:

а) по схеме на рис. 2а посредством модуля ФОС (рис. 1) определяют аварийные токи и напряжения \underline{U}_v , \underline{I}_v и далее – симметричные составляющие $\underline{U}_{\bar{z}}$, $\underline{I}_{\bar{z}}$ (модуль ФСС на рис. 1) текущего режима;

б) на схеме рис. 2б приведена модель аварийного режима, из которой определяют эквивалентные сопротивления:

$$\underline{Z}_{1\text{экв}} = \underline{Z}_{2\text{экв}} = \underline{U}_2^{\text{ав}} / \underline{I}_2^{\text{ав}}; \quad \underline{Z}_{0\text{экв}} = \underline{U}_0^{\text{ав}} / \underline{I}_0^{\text{ав}}.$$

Сопротивления линии прямой, обратной и нулевой последовательностей $\underline{Z}_{1л} = \underline{Z}_{2л}$, $\underline{Z}_{0л}$ рассчитываются по стандартным выражениям [8]. Зависимость $\underline{Z}_{0л} = f(l_f)$ сопротивления линии нулевой последовательности от места КЗ не рассматривается;

в) на схеме (рис. 2в) рассмотрена модель предшествующего режима, из которой определяют величину эквивалентной ЭДС:

$$\underline{E}_{1\text{экв}} = \underline{U}_{1\text{пред}} + \underline{I}_{1\text{пред}} \cdot \underline{Z}_{1\text{экв}}.$$

В режиме симметричного трехфазного КЗ ($K^{(3)}$) на шинах смежной ПС (или на 85% длины) (рис. 3) с учетом заранее подготовленных погонных сопротивлений всех последовательностей и рассчитанных эквива-

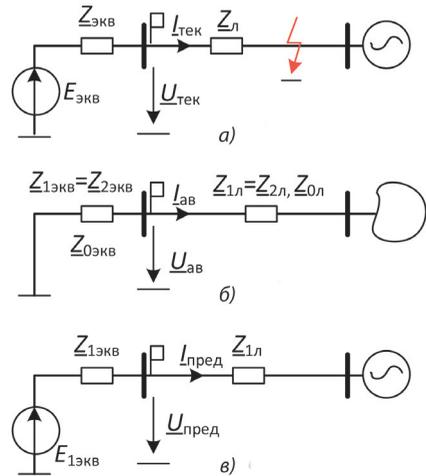


Рис. 2. К определению эквивалентов энергосистемы

лентных сопротивлений и эквивалентной ЭДС (рис. 2) вычисляются токи КЗ $\underline{I}_{1\text{КЗ}}$ для определения зоны действия 1-й ступени МТЗ. При условии, что величина $\underline{I}_{1\text{тек}}$ превышает рассчитанный ток КЗ $\underline{I}_{1\text{КЗ}}$, т. е.

$$\text{mod}(\underline{I}_{1\text{тек}}) \geq \text{mod}(\underline{I}_{1\text{КЗ}}), \quad (8)$$

должна работать 1-я ступень.

При условии $\underline{I}_{1\text{тек}} < \underline{I}_{1\text{КЗ}}$ необходимо рассмотреть выбор 2-й или 3-й ступени защиты.

Исходя из максимально возможной зоны действия 2-й ступени МТЗ, требуется расчет токов КЗ при $K^{(3)}$ либо на смежной линии, либо на смежной стороне трансформатора. На схеме модели сети (рис. 4) показан случай расчета токов на расстоянии 60% длины смежной линии. В отличие от расчетов для 1-й ступени, для 2-й ступени необходимо учитывать коэффициент токораспределения $K_{\text{ток}}$. Если от шин смежной ПС отходят несколько линий, то расчетной будет самая короткая из них. Условие выбора 2-й ступени:

$$\text{mod}(\underline{I}_{1\text{тек}}) \geq \text{mod}(\underline{I}_{1\text{защ}}) = K_{\text{ток}} \cdot \text{mod}(\underline{I}_{1\text{КЗ}}), \quad (9)$$

где $K_{\text{ток}} = \text{mod}(\underline{I}_{1\text{защ}}) / \text{mod}(\underline{I}_{1\text{КЗ}})$ – коэффициент токораспределения в схеме на рис. 4.

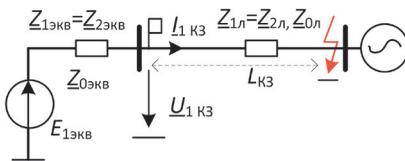


Рис. 3. Расчетная модель для определения адаптивной уставки 1-й ступени МТЗ

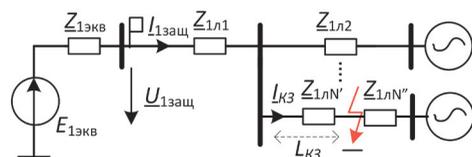


Рис. 4. Расчетная модель для определения адаптивной уставки 2-й ступени МТЗ

Если текущее значение измеренного тока в устройстве защиты $I_{1 \text{ тек}}$ не удовлетворяет условиям (8) и (9), то принимается решение о работе 3-й ступени МТЗ, уставка которой отстраивается от максимального нагрузочного режима:

$$\text{mod}(I_{1 \text{ тек}}) \geq K_{\text{отс}} \text{mod}(I_{\text{раб макс}}), \quad (10)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,2$ – коэффициент отстройки;

$I_{\text{раб макс}}$ – рабочий максимальный ток присоединения. В расчетах может быть принят равным паспортному значению длительно допустимого тока линии.

Невыполнение условия (10) говорит о коммутации нагрузки в сети.

Выводы

1. Адаптивная уставка защиты с одной подведенной величиной рассчитывается в темпе процесса изменения режима сети на основе измеренных текущих и предшествующих (нагрузочных) величин токов (напряжений).

2. Разработана методика определения выбора ступени защиты с уставками, адаптивными к изменению текущей измеренной величины тока (напряжения).

Литература:

1. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В. Диагностика линии электропередачи. В кн. Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. - Чебоксары: Изд-во чуваш. ун-та, 1992. - С. 9-33.
2. Концепция развития релейной защиты, автоматики и автоматизированных систем управления технологическими процессами электросетевого комплекса группы компаний «Россети». Москва, 2022.
3. Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Фальков А.А. Автоматизация расчетов адаптивной многопараметрической релейной защиты для реконфигурируемых распределительных сетей // Релейщик. - 2022. - № 1 (42). - С. 12–16.
4. Лямец Ю.Я., Ефремов В.А. Способ выделения аварийной слагаемой тока короткого замыкания. Патент 2058747 Россия БИ № 12, 1996.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 9. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линии 110-330 кВ. М.: Энергия, 1972.
6. Руководящие указания по релейной защите, выпуск 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110-500 кВ. - М.: Энергия, 1980. - 88 с.
7. Ефремов В.А., Мартынов М.В., Буров А.В., Гайдаш А.А. Адаптивная дистанционная защита линии электропередачи // Релейная защита и автоматизация. - №04 (21). - 2015. - С. 21-25
8. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. - М.: Энергия, 1970. - 455 с. [5]

VI ВСЕРОССИЙСКИЙ ОТКРЫТЫЙ КОНКУРС РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ СТУДЕНТАМИ И АСПИРАНТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ СИМУЛЯТОРОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

ЗАО «ЭнЛАБ» приглашает учащихся электроэнергетических и электротехнических специальностей принять участие в традиционно проводимом конкурсе квалификационных и научно-исследовательских работ, выполненных с использованием цифровых симуляторов для моделирования переходных процессов в энергосистемах. В конкурсе предусмотрены номинации для студентов бакалавриата, магистратуры и аспирантов, а также номинации по тематикам компаний-партнеров конкурса АО «НИЦ ЕЭС», НПП «ЭКРА», Ponovo.

Победители конкурса будут награждены почетными дипломами и денежными призами. Им будет предоставлена возможность выступить со своими докладами на конференции молодежной секции PHK CIGRE.



Работы для участия в конкурсе будут приниматься до 15 августа 2023 г.

С подробной информацией о нашем конкурсе можно ознакомиться на сайте ЗАО «ЭнЛАБ» в разделе «Мероприятия/студенческий конкурс» по ссылке <https://ennlab.ru/category/events/tenders/>

Со всеми вопросами можно обращаться в организационный комитет конкурса по e-mail: competition@ennlab.ru