

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЗАЩИТЕ СИСТЕМОЙ ЗАНУЛЕНИЯ

О.Н. Дробязко

К настоящему времени разработано достаточно много математических моделей для оценки эффективности систем электробезопасности. Аналитический обзор таких моделей, произведенный в [1], позволяет сделать заключение о том, что наиболее удобными для практического использования являются модели, разработанные в [2].

Такие модели, разработанные, в первую очередь, для объектов агропромышленного комплекса (АПК), позволяют учесть реальные характеристики проектируемых или реконструируемых объектов. Они описывают совокупность установленных на объектах электроустановок, взаимодействие людей с электроустановками, а также систему электрозащиты. Реализованный в этих моделях метод тополого-вероятностного моделирования позволяет рассчитывать вероятности электропоражений каждого из работников объекта с учетом широкого круга факторов, влияющих на их электробезопасность при защите от косвенного прикосновения системой зануления.

Рассматриваемые модели являются трехуровневыми. В них выделяются: 1) уровень моделирования однокасательного взаимодействия человека и электроустановки с учетом действия одного аппарата защиты, 2) уровень моделирования взаимодействия одного человека со всеми электроустановками объекта с учетом действия системы защиты, 3) уровень взаимодействия всех людей объекта со всеми электроустановками объекта.

Рассматриваемые модели, несмотря на их достоинства, требуют доработки, в первую очередь, на первом уровне. Здесь необходимо произвести более глубокое обоснование основ построения моделей (включая систему принятых допущений), а также осуществить учет *эффекта отдергивания руки*, возникающего при прикосновении человека к открытым проводящим частям (ОПЧ) электроустановки, оказавшимся под напряжением. (На необходимость учета такого эффекта с 90-х годов указывалось в работах А.И. Якобса, например, в [3]).

В связи с этим в данной работе рассмотрим концептуальную модель, описывающую взаимодействие человека с электроустановками на некотором объекте, а также разработанные нами формулы, позволяющие рассчитывать вероятности электропоражения людей при их однокасательном взаимодействии с учетом эффекта отдергивания руки.

Концептуальная модель.

Как известно, электропоражение человека в условиях *косвенного прикосновения* в рамках вероятностных представлений возможно при одновременном свершении двух случайных событий: касания человеком открытых проводящих частей (ОПЧ) электроустановки (корпуса электроустановки) и наличии напряжения на этой части, появившегося вследствие повреждения изоляции токоведущих частей электроустановки.

Такие события должны быть совмещены в пространстве и во времени. Электропоражение возможно лишь при наличии определенной конечной длительности воздействия тока на тело человека, обусловленной совмещением указанных событий.

Более подробное рассмотрение совмещения указанных событий требует детального учета следующих процессов: 1) включения и выключения электроустановки; 2) касаний человеком ОПЧ электроустановок; 3) появления напряжения на ОПЧ электроустановок.

Описание процесса включений и выключений электроустановок.

В процессе функционирования производственного объекта АПК на нем осуществляются разнообразные включения и выключения электроустановок, обеспечивающие выполнение различных технологических процессов. (В качестве отдельных электроустановок объекта будем рассматривать его электроприемники, распределительные устройства, электрические аппараты, кнопки управления и другие компоненты).

Факт появления напряжения на корпусе электроустановки зависит от типа системы электроснабжения. Так, в системе TN-C

приходится учитывать, что напряжение на ее корпусе может появиться как при ее нахождении во включенном состоянии, так и в выключенном состоянии. Во втором случае напряжение появляется в связи с возможностью “заноса” напряжения с другой электроустановки по нулевому защитному проводу (PEN-проводнику).

Физической первопричиной появления напряжения на ОПЧ является повреждение изоляции электроустановки, вызывающее замыкание фазного провода на корпус или на нулевой провод.

На производственном объекте АПК в большинстве случаев имеет место достаточно *устойчивая цикличность* в процессах включения и выключения электроустановок, обусловленная цикличностью технологических процессов. Например, в животноводческих помещениях основные электрифицированные технологические процессы, такие как доение и навозоудаление, реализуются ежедневно в одной и той же достаточно жесткой последовательности.

К описанию цикличности процессов включения-выключения может быть применен как “моментный”, так и “интервальный” подход.

При первом подходе последовательности включений и выключений (отключений) электроустановок описываются путем фиксации *моментов времени* включения и выключения, отсчитываемых от некоторого момента времени, принимаемого за нулевой.

Моменты включений и выключений могут быть определены путем многократного хронометража технологических процессов и обработки полученных результатов методами статистического анализа. В этом случае будут получены средние значения этих моментов.

При втором подходе фиксируются *длительности* интервалов включения, определяющиеся моментами включения и выключения. Такие характеристики обычно бывают более устойчивыми, чем пары значений моментов включения и выключения.

Длительности интервалов могут быть определены тем же путем, что и моменты включения и выключения электроустановок.

Наличие устойчивых циклов позволяет ограничиться описанием последовательностей включений и выключений в пределах одного цикла. Такие последовательности в пределах цикла можно представить в виде *временной диаграммы*. Так, для суточной диаграммы по оси абсцисс

будем откладывать время, изменяющееся от 0 до 24 часов, а по оси ординат – два уровня, нижний из которых будет соответствовать отключенному состоянию установки, а верхний – включенному. Например, при двухразовой дойке типичная диаграмма включения-выключения вакуум-насоса будет иметь следующий вид (рис. 1).

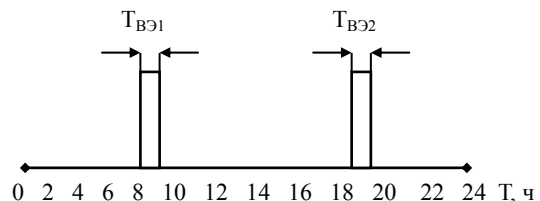


Рис. 1. Диаграмма включения-выключения электроустановки.

Технологические процессы на предприятиях АПК могут иметь различное число включений и выключений за цикл, включая вариант постоянного включения.

Периодическое включение и выключение электроустановок может осуществляться либо непосредственно человеком (с помощью органов управления), либо осуществляться специальными автоматическими устройствами.

Будем в дальнейшем обозначать длительность интервала включения электроустановки символом $T_{вэ}$, а моменты времени, определяющие начало и конец интервала включения – символами $t_{вэн}$ и $t_{вэк}$.

Отметим, что на практике минимальная длительность интервала включения электроустановки ограничивается величиной 10 с.

Описание процесса касаний

В процессе выполнения своих служебных обязанностей человек касается ОПЧ электроустановки или связанного с ней технологического оборудования. Такие касания в большинстве случаев имеют достаточно стабильные характеристики. Как и в случае процесса включения-выключения электроустановок, начало и окончание касания, а также их длительность могут быть определены как средние величины по результатам статистического анализа хронометража технологических процессов.

Длительности касаний человеком ОПЧ электроустановок в зависимости от технологического процесса могут составлять от нескольких секунд, до нескольких минут.

Примерами кратковременных касаний являются касания металлического корпуса кнопки управления при включении

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЗАЩИТЕ СИСТЕМОЙ ЗАНУЛЕНИЯ

электроустановки, длительных касаний – касание крана водонагревателя при заборе горячей воды для обслуживания процесса дойки.

Будем в дальнейшем обозначать длительность касания корпуса электроустановки символом $T_{\text{кас}}$, а моменты времени, задающие начало и конец этого интервала, – символами $t_{\text{касн}}$ и $t_{\text{каск}}$. На временных диаграммах будем изображать касания аналогично включениям электроустановки, откладывая на оси ординат диаграммы два уровня, верхний из которых будет отвечать наличию касания.

Касание корпуса некоторой электроустановки человеком целесообразно рассматривать только в *фазе включения* этой электроустановки, поскольку только в этих условиях возможно появление напряжения на ее ОПЧ. В пределах одной такой фазы в общем случае может иметь место несколько касаний электроустановки.

Для совместного изображения процесса включений и выключений и касаний будем использовать совмещенные временные диаграммы. При этом уровень касаний будем изображать выше, чем уровень включений.

На практике реализуется большое число различных вариантов *взаимного расположения* во времени интервалов касания и включения электроустановок. Такие варианты целесообразно разделить на три вида.

К *первому виду* отнесем такие варианты расположения интервалов, при которых момент начала касания не совпадает с моментом начала включения или момент окончания касания не совпадает с моментом выключения электроустановки. Будем говорить, что в этом случае интервал касания занимает **внутреннее положение** по отношению к интервалу включения электроустановки.

Такие касания имеют место, например, при отборе горячей воды дояркой из крана, при условии, что водонагреватель был включен и будет выключен другим работником. Совмещенная временная диаграмма рассматриваемых процессов приведена на рис. 2. При этом на диаграмме касания обозначены более высоким уровнем, чем включе

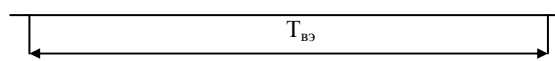
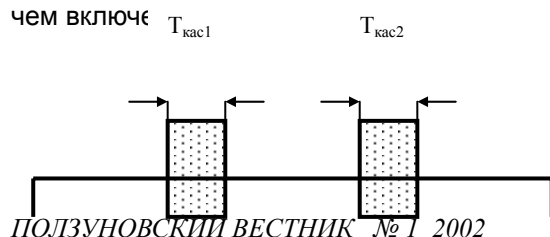


Рис. 2. Внутренние положения интервала касания.

Ко *второму виду* отнесем такие варианты взаимного расположения интервалов, при которых момент начала касания совпадает с моментом начала включения и (или) момент конца касания совпадает с моментом конца включения электроустановки. В этом случае будем говорить, что интервал касания занимает *граничное положение* по отношению к интервалу включения электроустановки. Возможны два вида граничного положения интервала касания: левое и правое. На одном интервале включения может реализоваться как один такой вид касаний, так и оба вида одновременно.

Пример временной диаграммы, отражающей граничные положения касаний по обеим границам интервала включения, приведен на рис. 3.

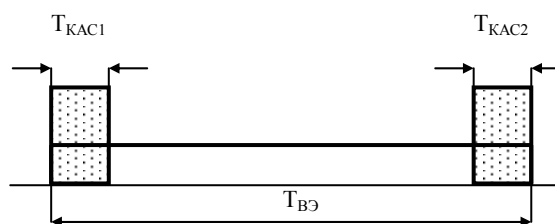


Рис. 3. Граничные положения интервала касания.

Третий вариант взаимного расположения интервалов объединяет два предыдущих. Он соответствует ситуации, когда один и тот же работник включает, выключает электроустановку, а также касается ее в процессе работы. Такой вариант взаимного расположения интервалов может быть проиллюстрирован рисунком, получаемым в результате совмещения рис. 2. и 3.

Следует отметить, что возможности хронометража ограничивают минимальную продолжительность касаний величиной 1 с, а точность определения длительности касаний – величиной ± 1 с. На точность определения длительности касаний влияет также и случайный разброс их значений.

Описание процесса появления и существования напряжения на ОПЧ электроустановки.

Возникновение напряжения на ОПЧ электроустановки возможно только в фазе ее включения. Такое напряжение существует в

течение некоторого интервала времени, длительность которого определяется временем срабатывания соответствующего аппарата защиты от аварийных режимов, возникающих в этой электроустановке.

Будем в дальнейшем называть рассматриваемый интервал времени *временем существования напряжения* на ОПЧ электроустановки и обозначать его символом T_H . Для обозначения моментов появления и окончания напряжения будем использовать символы t_{HH} и t_{HK} .

На временной диаграмме время существования напряжения будем изображать аналогично включениям и касаниям электроустановок. При этом уровень наличия напряжения будем изображать выше уровней касаний и включений. Будем использовать совмещенные временные диаграммы, одновременно отражающие включения, касания и появления напряжения.

Рассматриваемое напряжение может возникнуть в *любой заранее неизвестный* момент времени в течение интервала (фазы) включения электроустановки. При этом момент появления напряжения t_{HH} может как попасть, так и не попасть на интервал касания электроустановки.

Опасность электропоражения возникает при условии одновременного наличия напряжения на ОПЧ электроустановки и касании человеком этих частей электроустановки.

На временной диаграмме совместному свершению этих событий соответствует *область пересечения* интервалов T_H и $T_{кас}$. На практике возможны разнообразные случаи пересечения интервалов T_H и $T_{кас}$.

В дальнейшем при моделировании процессов взаимодействия человека и электроустановки важное значение будет иметь разделение всех пересечений на *две* группы в зависимости от *соотношений* между *длительностями интервалов* T_H и $T_{кас}$. В первую группу включим пересечения, характеризующиеся соотношением $T_H < T_{кас}$, во вторую – соотношением $T_H \geq T_{кас}$.

Характерный пример, отвечающий первой группе, приведен на рис. 4. Он отвечает ситуации, когда человек касается ОПЧ включенной электроустановки, обеспечивающей выполнение некоторого технологического процесса, а *появление напряжения* на ОПЧ электроустановки происходит *в процессе касания*.

T_H

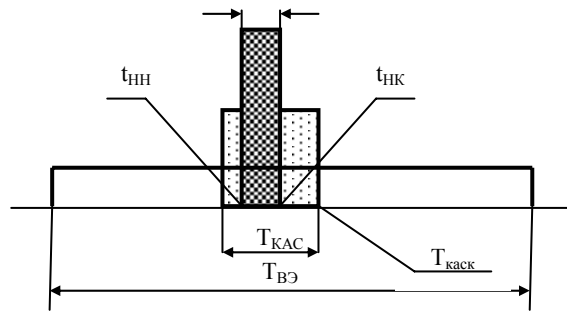


Рис. 4. Соотношение между интервалами при $T_H < T_{кас}$.

На рисунке показано ожидаемое положение интервала касания $T_{кас}$ по отношению к интервалу включения $T_{вз}$, характерное для некоторого технологического процесса, а также длительность существования напряжения T_H , обусловленная действием аппарата защиты.

Рассматриваемый случай является типичным для эффективной системы защиты, в которой срабатывание аппарата защиты происходит в течение десятых или сотых долей секунды.

Появление напряжения на ОПЧ электроустановки с последующим срабатыванием аппарата защиты изменяет расположение ожидаемого момента окончания касания $t_{кас}$, ожидаемого в соответствии с диаграммой касаний. Такие изменения обусловлены различными *физиологическими реакциями* человека, возникающими при его попадании под напряжение и зависящими от характера касания человеком ОПЧ.

Если при касании ладонь охватывает ОПЧ, то возможно возникновение эффекта неотпускания, заключающегося в *рефлекторном обхватывании* ладонью ОПЧ электроустановки и невозможности дальнейшего самостоятельного разрыва цепи.

В этом случае фактический момент окончания касания определяется моментом окончания срабатывания аппарата защиты (т.е. моментом t_{HK}).

Если при касании ладонь не охватывает ОПЧ, то возникает эффект *отдергивания* руки. Такой эффект на протяжении ряда лет описывался различным образом. Согласно последним представлениям [3] “при прикосновении человека к находящемуся под фазным напряжением корпусу прибора и попадании под напряжение прикосновения, действующего по пути рука-рука или рука-

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЗАЩИТЕ СИСТЕМОЙ ЗАНУЛЕНИЯ

ноги, в случае отсутствия или отказа автоматических систем – зануления или (и) защитного отключения – или срабатывания таких систем за время более 0,7 с человек самопроизвольно импульсивно разрывает электрическую цепь (например, отдергивает руку от корпуса прибора) за время 0,2 - 0,7 с, распределенное по закону равномерной плотности”.

Таким образом, при наличии эффекта отдергивания руки происходит ограничение длительности воздействия напряжения на ОПЧ электроустановки некоторой величиной из диапазона 0,2-0,7 с. В силу этого время воздействия напряжения на человека может оказаться меньшим, чем T_H .

Характерный пример, отвечающий второй группе пересечений (отвечающих соотношению $T_H \geq T_{\text{кас}}$) приведен на рис. 6. Он отвечает ситуации, когда касание человеком ОПЧ электроустановки, находящейся под напряжением, происходит в процессе относительно длительного срабатывания системы защиты (свыше 1 с). Сюда же относится ситуация, когда происходит отказ защитной системы.

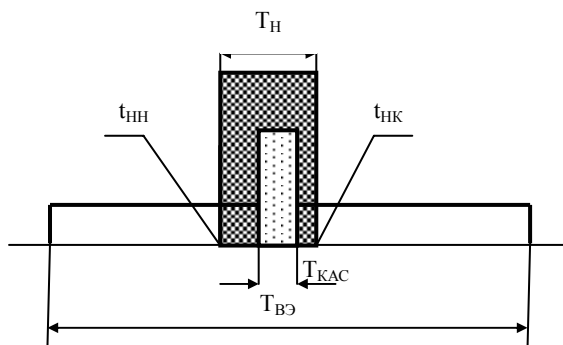


Рис. 5. Соотношение между интервалами при $T_H \geq T_{\text{кас}}$.

В этих случаях длительность срабатывания защиты оказывается *сравнимой* с относительно непродолжительным временем касания.

На рис. 5 показано ожидаемое положение интервала касания $T_{\text{кас}}$ по отношению к интервалу включения $T_{\text{вз}}$, установленное для данного технологического процесса. Там же показана длительность существования напряжения T_H , обусловленная действием системы защиты.

Наличие напряжения на ОПЧ при касании также существенно ожидаемую длительность процесс касания. Как и в предыдущем случае может иметь место как

эффект неотпускания, так и эффект отдергивания.

В рамках двух выделенных групп выделяется ряд частных случаев, определяющихся **соотношениями между границами интервалов T_H и $T_{\text{кас}}$** .

Так, выделяется группа случаев, при которых один из интервалов полностью “помещается” внутри другого интервала. Именно такие случаи приведены на рис. 4 и 5. Будем называть такие случаи **полными пересечениями** интервалов T_H и $T_{\text{кас}}$.

Возможны также случаи, когда один из интервалов лишь частично пересекает (перекрывает) другой интервал. Будем называть такие случаи **частичными пересечениями** интервалов. Примером таких пересечений может быть случай, когда момент начала касания попал на период наличия напряжения, а окончание воздействия напряжения произошло до окончания касания (рис. 6).

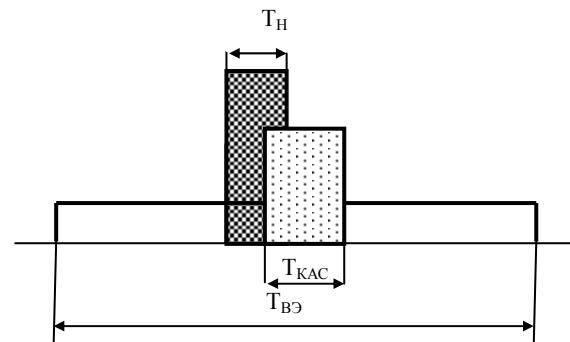


Рис. 6. Частичное пересечение интервалов T_H и $T_{\text{кас}}$.

Построение моделей

Основным содержанием данной работы является развитие моделей электропоражения человека в направлении учета эффекта отдергивания руки. Такой эффект учитывается на первом уровне рассмотренных выше моделей (на уровне однокасательного взаимодействия человека и электроустановки). При этом учитывается вероятность электропоражения человека при его единственном касании ОПЧ электроустановки в период ее включения. (При моделировании на последующих уровнях производится суммирование вероятностей электропоражений, имеющих место при “однокасательных” взаимодействиях).

В рамках данной работы используются основные принципы построения моделей, используемые в [2]: идея случайного “бро-

сания” интервала существования напряжения на ОПЧ электроустановки T_H на интервал его включения $T_{вэ}$, а также технология подсчета условных вероятностей электропоражений при “включении” человека в электрическую цепь $P(ЭП/Вкл)$.

Нами была развита технология подсчета длительности воздействия напряжения на человека (длительности его “включения” в цепь тока) с учетом положения и длительностей интервалов $T_{вэ}$, $T_{кас}$ и T_H , а также с учетом вероятностных характеристик эффекта отдергивания руки. При этом широко использовалась формула полной вероятности как в “обычной”, так и в интегральной форме (для конечного и бесконечного числа событий).

При построении рассматриваемых моделей возникла необходимость в делении их на классы и подклассы, в рамках которых были построены частные виды таких моделей.

Основаниями для деления послужили виды делений, принятые при построении концептуальной модели. Кроме того, для учета эффекта отдергивания возникла необходимость в дополнительном выделении трех групп длин интервалов длительности существования напряжения на ОПЧ. Такие длительности с использованием символики теории множеств (для случая $T_H < T_{кас}$) задаются следующим образом: 1) $T_H \in (0; 0,2 \text{ с})$, 2) $T_H \in [0,2 \text{ с}; 0,7 \text{ с}]$, 3) $T_H \in (0,7 \text{ с}; T_{кас})$.

Структура деления моделей, учитывающих эффект отдергивания руки, для $T_H < T_{кас}$ приведена на рис. 7. (Аналогичную структуру имеет деление моделей и для $T_H \geq T_{кас}$).

Разработанные нами математические модели имеют вид формул, описывающих вероятности электропоражения человека при их однокасательном взаимодействии с электроустановкой. Для их идентификации во введенных классах и подклассах введем специальную символику.

Такая символика вводится в нижние индексы различных вероятностей электропоражений. Индексы имеют несколько частей, отделенных разделителями “/” и “//”.

Первая позиция индекса предназначена для учета эффекта отдергивания. При учете этого эффекта в обозначение вводится символ “отд”, при отсутствии учета символ не проставляется.

Вторая позиция описывает положение интервала касания относительно интервала включения. Для внутреннего положения этого

интервала используется символ “внут”, для граничных касаний – левого и правого – “гран.л” и “гран.п” соответственно. После второй позиции ставится разделитель “//”.

Третья позиция отражает характер пересечений интервалов T_H и $T_{кас}$. При полном пересечении интервалов используется символ “полн”, при частичном правом пересечении – символ “ч.п.п”, при частичном левом пересечении – “ч.л.п”.

Четвертая позиция составного индекса описывает диапазон значений интервала T_H .

Рассмотрим построенные модели.

Случай “Внутреннее положение интервала $T_{кас}$ – “Полное пересечение интервалов T_H и $T_{кас}$ ”.

Для $T_H \in (0; 0,2 \text{ с})$:

$$P(ЭП)[T_{вэ}, T_{кас}, T_H]_{отд/внут//полн/(0; 0,2)} = \\ = (P(НапрОПЧ)_T / K_{Твэ}) \times \\ \times \{ ((T_{кас} - T_H) / (T_{вэ} - T_H)) \cdot P(ЭП/Вкл)[T_H] \}. \quad (1)$$

Для $T_H \in [0,2 \text{ с}; 0,7 \text{ с}]$:

$$P(ЭП)[T_{вэ}, T_{кас}, T_H]_{отд/внут//полн/[0,2; 0,7]} = \\ = (P(НапрОПЧ)_T / K_{Твэ}) \cdot ((T_{кас} - T_H) / (T_{вэ} - T_H)) \times \\ \times \tilde{P}(ЭП/Вкл)[T_H]_{отд/внут/[0,2; 0,7]}, \quad (2)$$

где

$$\tilde{P}(ЭП/Вкл)[T_H]_{отд/внут/[0,2; 0,7]} = \\ = \frac{1}{0,5} \int_{0,2}^{T_H} P(ЭП/Вкл)[\tau_H] d\tau_H + \\ + \frac{(0,7 - T_H)}{0,5} P(ЭП/Вкл)[T_H]. \quad (3)$$

Для $T_H \in (0,7 \text{ с}; T_{кас})$.

$$P(ЭП)[T_{вэ}, T_{кас}, T_H]_{отд/внут//полн/(0,7; T_H)} = \\ = (P(НапрОПЧ)_T / K_{Твэ}) \times \\ \times \{ ((T_{кас} - T_H) / (T_{вэ} - T_H)) \times \\ \times \frac{1}{0,5} \int_{0,2}^{0,7} P(ЭП/Вкл)[\tau_H] d\tau_H \} \quad (4)$$

Случай “Внутреннее положение интервала $T_{кас}$ – “Частичное левое пересечение интервалов T_H и $T_{кас}$ ”.

Для $T_H \in (0; 0,2 \text{ с})$:

$$P(ЭП)[T_H, T_{вэ}]_{отд/ч.л.п/(0; 0,2)} = \\ = (P(НапрОПЧ)_T / K_{Твэ}) \cdot (T_H / (T_{вэ} - T_H)) \times$$

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ
ПРИ ЗАЩИТЕ СИСТЕМОЙ ЗАНУЛЕНИЯ

$$\times \bar{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{ч.л.п.}/(0;0,2)}, \quad (5)$$

где

$$\bar{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{ч.л.п.}/(0;0,2)} = \frac{1}{0,2} \int_0^{0,2} P(\text{ЭП/Вкл})[\tau_n] d\tau_n$$

Для $T_n \in [0,2 \text{ с}; 0,7 \text{ с}]$:

$$P(\text{Вкл})[T_n, T_{\text{вз}}]_{\text{отд./ч.л.п.}/[0,2; 0,7]} =$$

$$= (P(\text{НапрОПЧ})_T / K_{T_{\text{вз}}}) \times$$

$$\times \tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{отд./ч.л.п.}/[0,2; 0,7]}, \quad (6)$$

где

$$\tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{отд./ч.л.п.}/[0,2; 0,7]} =$$

$$= \frac{0,2}{T_{\text{вз}} - T_n} \bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_n]_{\text{ч.л.п.}/(0;0,2)} +$$

$$+ \frac{T_n - 0,2}{T_{\text{вз}} - T_n} \tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_n]_{\text{отд./ч.л.п.}/[0,2; 0,7]}$$

в свою очередь

$$\tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{отд./ч.л.п.}/[0,2; 0,7]} = \frac{1}{T_n - 0,2} \int_{0,2}^{T_n} \bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[\varphi] d\varphi.$$



Рис. 7. Структура деления моделей при $T_H < T_{кас}$.

Подынтегральная функция определяется следующим образом:

$$\tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})[\tau_H] = A[\tau_H] + B[\tau_H],$$

где

$$A[\tau_H] = \frac{(\tau_H - 0,2)}{0,5} \cdot \frac{1}{(\tau_H - 0,2)} \int_{0,2}^{\tau_H} P(\text{ЭП/Вкл})[\tau] d\tau,$$

$$B[\tau_H] = \frac{(0,7 - \tau_H)}{0,5} P(\text{ЭП/Вкл})[\tau_H].$$

Для $T_H \in (0,7 \text{ с}; T_{кас})$.

$$P(\text{Вкл})[T_H, T_{вз}]_{\text{отд/ч.л.п.}/[0,7; T_{кас}]} =$$

$$= (P(\text{НапрОПЧ})_T / K_{Твз}) \times$$

$$\times \tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{отд/ч.л.п.}/[0,2; 0,7]}, \quad (7)$$

где

$$\tilde{P}(\text{ЭП/Вкл}) = \frac{0,2}{T_{вз} - T_H} \bar{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{ч.л.п.}/(0; 0,2)} +$$

$$+ \frac{0,5}{T_{вз} - T_H} \tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{ч.л.п.}/[0,2; 0,7]} +$$

$$+ \frac{T_H - 0,7}{T_{вз} - T_H} P(\text{ЭП/Вкл})_{\text{ч.л.п.}/(0,7; T_{кас})};$$

в свою очередь,

$$\bar{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{ч.л.п.}/[0; 0,2]} = \frac{1}{0,2} \int_0^{0,2} P(\text{ЭП/Вкл})[\tau_H] d\tau_H;$$

$$\tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{отд/ч.л.п.}/[0,2; 0,7]} = \frac{1}{0,5} \int_{0,2}^{0,7} \tilde{P}(\text{ЭП/Вкл})[\tau_H] d\tau_H;$$

$$\bar{P}(\text{ЭП/Вкл})_{\text{ч.л.п.}/(0,7; T_{кас})} = \frac{1}{0,5} \int_{0,2}^{0,7} P(\text{ЭП/Вкл})[\tau_H] d\tau_H.$$

Случай "Внутреннее положение интервала $T_{кас}$ – "Частичное правое пересечение интервалов T_H и $T_{кас}$ "

Можно показать, что вероятности электропоражений при частичном правом пересечении будут численно равны тем же вероятностям для частичных левых пересечений.

Вероятность электропоражений при внутреннем положении интервала касания

будет равна сумме вероятностей при частичном левом пересечении, полном пересечении и частичном правом пересечении.

$$\begin{aligned} P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_H]_{\text{отд/внут}} &= \\ &= P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_H]_{\text{отд/внут/полн}} + \\ &+ P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_H]_{\text{отд/ч.л.п.}} + \\ &+ P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_H]_{\text{отд/ч.п.п.}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Формула (8) будет использоваться для каждого из трех диапазонов длительностей интервала T_H .

Выражения для определения вероятности электропоражения в случаях граничных положений интервала $T_{кас}$ будут иметь по два компонента формулы (8). При этом для левого пересечения будет отсутствовать второе слагаемое, а для правого – третье.

Таким образом, разработана совокупность формул, позволяющих подсчитывать вероятности электропоражений людей при их однокасательном взаимодействии с электроустановкой при защите системой зануления с учетом эффекта отдергивания руки. Это позволит повысить точность моделирования электробезопасности людей на объектах АПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дробязко О.Н. Развитие методов моделирования и оптимизации систем электропожаробезопасности // Вестник АлтГТУ, 2000. №3. С.44-49.
2. Дробязко О.Н. Метод автоматизированного проектирования комплексной электробезопасности на сельскохозяйственных объектах. Автореф. дисс. ... канд.техн.наук. - Барнаул, АлтГТУ, 1994. - 21 с.
3. Якобс А.И., Вайнберг М.Е., Кузилин А.В. Анализ электрозащитной эффективности зануления и устройств защитного отключения применительно к бытовым электроприборам, питаемым от однофазных сетей 220 В жилых и общественных зданий // Промышленная энергетика, 1995. №10. С.43-46.