

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТЕ ПРИ ЗАЩИТЕ СИСТЕМОЙ ЗАНУЛЕНИЯ

О.К. Никольский, В.С. Германенко, О.Н. Дробязко

К настоящему времени разработаны различные методы оценки электробезопасности или показателей безопасности эксплуатации электроустановок. Основная цель такой оценки – построение наиболее эффективных систем обеспечения электробезопасности.

Рассматриваемые методы достаточно разнообразны. В первую очередь они разделяются на группы в зависимости от используемых в них подходов к оценке электробезопасности. В работе [1] выделены два таких метода или подхода – токовый и вероятностный.

Сущность первого подхода заключается в определении тока, протекающего через тело человека при прикосновении к токоведущим частям электроустановок, находящимся под напряжением, или к корпусам электрооборудования, оказавшимся под напряжением при повреждении изоляции. Полученные значения сравниваются с длительно-допустимым током. Рассматриваемый подход учитывает физиологическое действие электрического тока на органы человека.

Вероятностный подход к оценке электробезопасности заключается в определении вероятности электропоражения человека, учитывающей совокупность факторов, влияющих на возможность электропоражения человека в определенных условиях (в частности, надежность электрооборудования, особенности прикосновений людей к различным частям электроустановок).

Оба подхода отражают две стороны процесса поражения человека электрическим током: случайный характер электропоражения и физиологическое действие электрического тока на организм человека.

В рамках вероятностного подхода в [1] выделены три метода определения вероятностных показателей безопасности эксплуатации электроустановок.

Первый из таких методов предполагает вычисление вероятности электропоражения человека $P(ЭП)$ за время T в виде произведения двух вероятностей: вероятности попадания человека под напряжение прикосновения $P(U_{пр})$ и условной вероятности $P(\Phi_n/U_{пр})$ такого физического состояния человека, при котором напряжение $U_{пр}$ при данной длительности воздействия t_b будет поражающим.

Второй метод предусматривает определение вероятности электропоражения на основе логической модели электропоражения.

Третий метод позволяет определить вероятность электропоражений на основе статистических данных об электротравмах.

Каждый из рассмотренных методов имеет свои достоинства и недостатки. Так, в качестве недостатка первого метода указана сложность определения условной вероятности $P(\Phi_n/U_{пр})$.

По окончании анализа методов анализа безопасности электроустановок в [1] сделано заключение о необходимости разработки методики, объединяющей оба подхода к оценке электробезопасности: вероятностного и токового. Выделен также перечень задач, решение которых необходимо для создания такой методики. При этом, в частности, выделена задача разработки математических моделей электропоражений с учетом величины тока, протекающего через человека.

На наш взгляд, задача, поставленная в [1], к настоящему времени в значительной степени решена. Существенный вклад в ее решение был сделан сотрудниками лаборатории электробезопасности Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), возглавляемой профессором А.И. Яковсом. В конце 1970-х гг. ими был разработан метод расчета условных вероятностей электропоражения человека [2, 3], включающий две составляющие: 1) получение плотностей распределений $f(I_q)$ случайных значений токов I_q через тело человека при его попадании под напряжение, 2) формулу для подсчета условной вероятности электропоражений на основе плотностей распределений $f(I_q)$.

При нахождении плотностей распределений $f(I_q)$ учитывались законы распределений случайных значений сопротивлений в цепи тока через тело человека, полученных на основе экспериментальных данных (сопротивления тела человека, сопротивления обуви и сопротивления растеканию тока с ног человека). Распределение $f(I_q)$ определялось методом статистического моделирования с последующим получением аппроксимирующих аналитических выражений, описывающих $f(I_q)$. Были получены семейства распределений, характеристики которых зависели от материала пола и вида обуви.

Получение таких распределений сыграло решающую роль для практического использования вероятностных методов при оценке электробезо-

пасности и эффективности систем обеспечения электробезопасности.

Формула для подсчета условных вероятностей электропоражений $P(\Phi_n/U_{пр})$ (в обозначениях [1]) была построена на основе формулы полной вероятности в интегральной форме [4]. В подынтегральное выражение этой формулы наряду с $f(I_q)$ входит также функция, описывающая вероятность электропоражения человека при определенном значении тока I_q и длительности его воздействия t_q . В качестве последней в [2, 3] используются распределения пороговых неотпускающих и пороговых фибрилляционных токов. (Условная вероятность, получаемая по этой формуле, по существу имеет смысл математического ожидания вероятности электропоражения).

Рассмотренный метод расчета условной вероятности электропоражения и является, на наш взгляд, методом, реализующим токово-вероятностный подход к оценке электробезопасности, указанный в [1].

В 1994 г. автором был выполнен анализ математических моделей электробезопасности, построенных к тому времени в нашей стране и за рубежом [5]. Цель этого анализа – выделение класса моделей, пригодных для оценки состояния электробезопасности на некотором объекте, в рамках которого осуществляется регулярное взаимодействие группы людей с группой электроустановок при учете действия технической системы обеспечения электробезопасности.

Было обосновано, что наиболее удобны для практического использования в указанной сфере классов моделей вероятностные модели, в которых подсчитывается вероятность электропоражения человека на объекте за некоторый период времени T и в которых подсчет такой вероятности ведется на основе подсчета условной вероятности электропоражений по технологии ВИЭСХ, рассмотренной выше. Наиболее развитыми моделями такого класса к тому времени были модели, разработанные в [6].

В работе [5] рассматриваемый класс моделей (предусматривающих определение вероятностей электропоражений людей, работающих на некотором объекте) был развит в следующих аспектах.

Во-первых, в моделях были введены *топологические характеристики*.

В основе таких характеристик лежала разработанная при участии автора иерархическая нумерация участков системы электроснабжения (участков сети) объекта. Такая нумерация позволила, в частности, однозначно задавать электроустановку, являющуюся источником опасной ситуации. На базе такой нумерации была введена расширенная нумерация «начал» и «концов» участков сети,

позволившая в первую очередь задавать положение аппаратов защиты в системе электроснабжения. Расширенная нумерация позволила также соотнести с определенным участком сети и вероятности однофазных замыканий на корпус. Была введена также нумерация людей на объекте.

С учетом введенных нумераций каждая из формул, по которым рассчитывалась вероятность электропоражения человека, взаимодействующего с некоторой электроустановкой, характеризовалась номером электроустановки, явившейся источником опасной ситуации, номером человека, в процессе взаимодействия с определенной электроустановкой попавшего в опасную ситуацию, и номером аппарата защиты, защищающего человека в этой ситуации.

Во-вторых, в моделях была использована *вероятностно-детерминированная* технология подсчета вероятности попадания человека под напряжение определенной длительности (вероятности $P(U_{пр})$).

Детерминированный аспект технологии предполагал известную конечную длительность воздействия t_q напряжения (тока) на человека, определяющуюся временем срабатывания аппарата защиты. Такое время определяется на основе защитной характеристики определенного аппарата защиты с учетом значения тока однофазных замыканий на корпус.

Вероятностный аспект технологии предполагал учет случайного характера возникновения замыкания на корпус и учет случайного «пересечения во времени» включенного состояния электроустановки, касания человеком корпуса электроустановки и появления напряжения на корпусе электроустановки (в течение интервала времени t_q). При этом использовалась вероятностная схема «бросания наугад» интервала существования напряжения T_n на интервал касания человеком корпуса или открытых проводящих частей электроустановки $T_{кас}$.

В-третьих, алгоритм подсчета вероятности электропоражения людей на объекте при защите занулением имел *иерархический характер*.

В этом алгоритме сначала учитывались отдельные акты взаимодействий в системе «человек–электроустановка–система обеспечения электробезопасности». Далее на этой основе подсчитывалась суммарная опасность взаимодействия человека со всеми электроустановками объекта. Введенная нумерация позволила также учесть в алгоритме возможность отказа аппарата защиты и особенности работы системы зануления, связанные в эффекте «выноса потенциала».

Использование такой модели позволило в рамках работы [5] решить задачу моделирования системы комплексной безопасности электроустано-

вок в аспекте обеспечения безопасности человека, а далее на ее основе произвести решение задачи оптимизации системы комплексной безопасности электроустановок на объектах АПК.

В исследовании [6] при участии автора были осуществлены некоторые доработки такой модели.

В последние годы осуществлялось развитие и доработка моделей рассматриваемого класса в направлениях повышения уровня их обоснованности и учета новых факторов, обуславливающих электропоражение. Значительная часть результатов последних работ была опубликована в [7].

В ней, в частности, был уточнен иерархический характер модели. В ней были выделены три уровня: 1) уровень «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.

Основное содержание работы [7] посвящено вопросам развития модели на первом уровне.

Для этой цели нами прежде всего была разработана концептуальная модель электропоражения человека в условиях косвенного прикосновения, учитывающая различные случаи соотношений между интервалами времени, фигурирующими в моделях, и различные физиологические эффекты (эффект рефлекторного обхватывания ладонью открытых проводящих частей электроустановки и эффект рефлекторного отдергивания руки).

Далее на основе концептуальных моделей были уточнены и разработаны математические модели, позволяющие подсчитывать вероятности электропоражений при «однокасательных» взаимодействиях с учетом длительностей интервалов включения электроустановки $T_{вз}$, интервала касания человеком открытых проводящих частей $T_{кас}$ и длительности существования напряжения электроустановки $T_{н}$ (определяющейся временем срабатывания защиты).

В работе [7] приведены формулы, позволяющие вычислять вероятности электропоражений людей при их «однокасательных» взаимодействиях при учете эффекта отдергивания руки. При построении рассматриваемых моделей возникла необходимость в делении их на классы и подклассы, в рамках которых были построены частные виды таких моделей. Для записи различных вариантов формул была разработана специальная символика, учитывающая классификацию моделей.

В данной работе приводится группа формул, позволяющих вычислять вероятности электропоражений людей при их «однокасательных» взаи-

модействиях и учете эффекта рефлекторного обхватывания ладонью открытых проводящих частей электроустановки. (Одна из таких формул и была ранее разработана в [5]).

При построении рассматриваемых моделей возникла также необходимость в делении их на классы и подклассы и разработке специальной символики, отражающей эту классификацию.

Структура деления моделей для случая $T_{н} < T_{кас}$ приведена на рисунке 1.

Рассмотрим построенные модели. Примем во внимание, что условная вероятность электропоражений человека при воздействии на него напряжения в течение времени $T_{н}$ обозначается символом $P(\text{ЭП/Вкл})[T_{н}]$, вероятность появления напряжения на открытых проводящих частях электроустановки на протяжении интервала ее включения $T_{вз}$ – символом $P(\text{НапрОПЧ})_T[T_{вз}]$, количество интервалов включения электроустановки за год – $K_{Твз}$.

Случай «Внутреннее положение интервала $T_{кас}$ – полное пересечение интервалов $T_{н}$ и $T_{кас}$ ».

$$P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_{н}]_{\text{внут/полн}} = (P(\text{НапрОПЧ})_T[T_{вз}] / K_{Твз}) \times \{[(T_{кас} - T_{н}) / (T_{вз} - T_{н})] \cdot P(\text{ЭП/Вкл})[T_{н}]\}. \quad (1)$$

Случай «Внутреннее положение интервала $T_{кас}$ – частичное пересечение интервалов $T_{н}$ и $T_{кас}$ » (частичное левое и частичное правое пересечения).

$$P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{н}]_{\text{внут/ч.л.п}} = (P(\text{НапрОПЧ})_T[T_{вз}] / K_{Твз}) \cdot (T_{н} / (T_{вз} - T_{н})) \times \bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_{н}]_{\text{ч.л.п}}, \quad (2)$$

$$P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{н}]_{\text{внут/ч.п.п}} = (P(\text{НапрОПЧ})_T[T_{вз}] / K_{Твз}) \cdot (T_{н} / (T_{вз} - T_{н})) \times \bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_{н}]_{\text{ч.п.п}}. \quad (3)$$

Средние значения условных вероятностей электропоражения для обоих рассмотренных случаев пересечений определяются следующими выражениями:

$$\bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_{н}]_{\text{ч.л.п}} = \frac{1}{T_{н}} \int_0^{T_{н}} P(\text{ЭП/Вкл})[\tau_{н}] d\tau_{н}, \quad (4)$$

$$\bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_{н}]_{\text{ч.п.п}} = \frac{1}{T_{н}} \int_0^{T_{н}} P(\text{ЭП/Вкл})[\tau_{н}] d\tau_{н}. \quad (5)$$

Таким образом, вероятность электропоражения человека при одном касании электроустановки в случае внутреннего положения интервала касания

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТЕ
ПРИ ЗАЩИТЕ СИСТЕМОЙ ЗАНУЛЕНИЯ

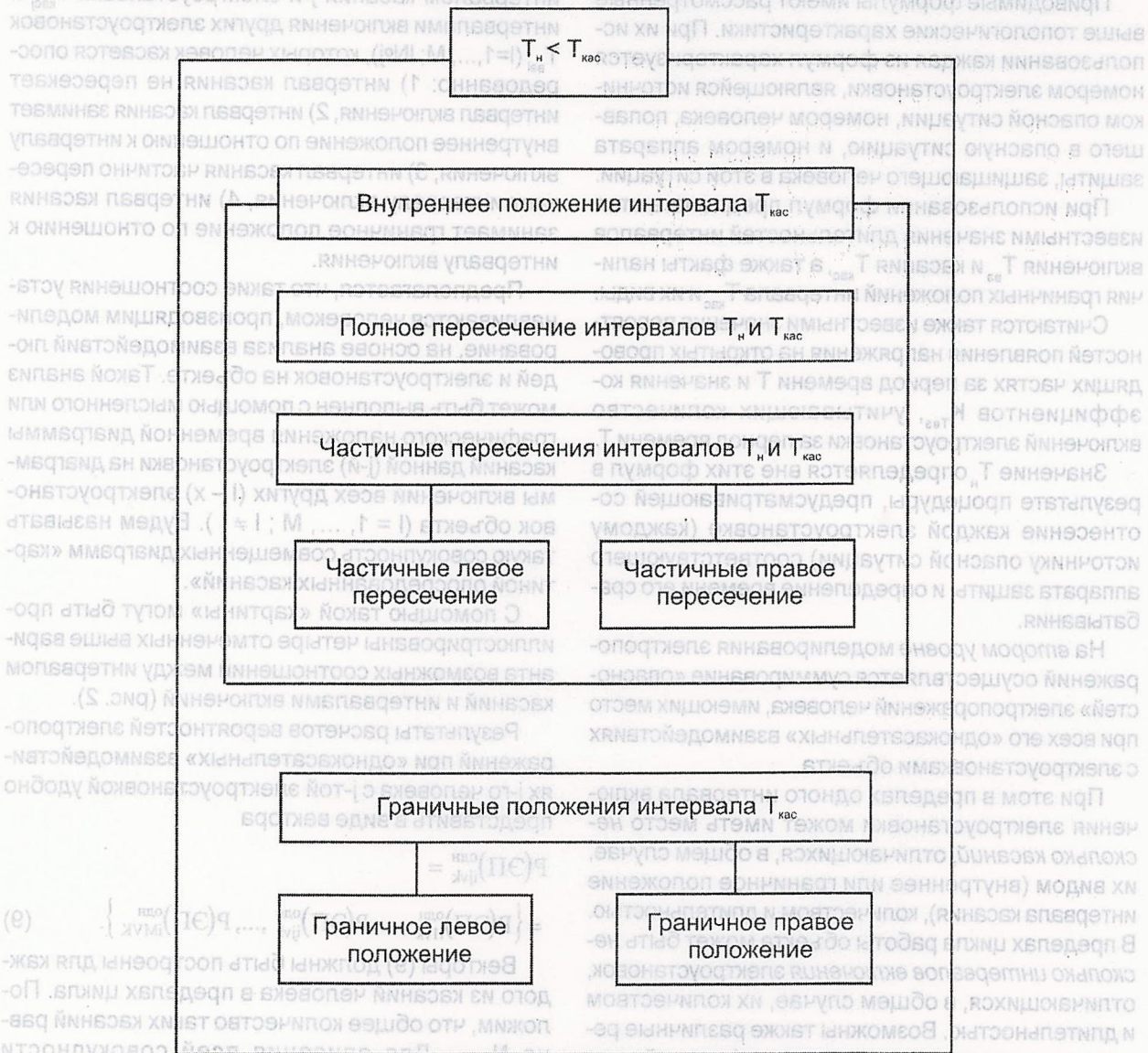


Рис. 1. Структура деления моделей при $T_n < T_{кас}$

ния при соотношении интервалов $T_n < T_{кас}$ может быть определена в виде суммы трех вероятностей

$$\begin{aligned}
 & P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_n]_{\text{внут}} = \\
 & = P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_n]_{\text{внут}} // \text{полн.п} + \\
 & + P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_n]_{\text{внут}} // \text{ч.л.п} + \\
 & + P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_n]_{\text{внут}} // \text{ч.п.п} = \\
 & = (P(\text{НапрОПЧ})_T / K_{Твз}) \times \{ [(T_{кас} - T_n) / \\
 & / (T_{вз} - T_n)] \cdot P(\text{ЭП/Вкл})[T_n] + (T_n / (T_{вз} - T_n)) \times \\
 & \times \bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_n]_{\text{ч.л.п}} + (T_n / (T_{вз} - T_n)) \times \\
 & \times \bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_n]_{\text{ч.п.п}} \}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Вероятность электропоражения в случае левого граничного касания будет определяться в виде:

$$\begin{aligned}
 & P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_n]_{\text{гран.л}} = \\
 & = P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_n]_{\text{гран.л}} // \text{полн.п} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_n]_{\text{гран.л}} // \text{ч.п.п} = \\
 & = (P(\text{НапрОПЧ})_T / K_{Твз}) \times \\
 & \times \{ [(T_{кас} - T_n) / (T_{вз} - T_n)] \cdot P(\text{ЭП/Вкл})[T_n] + \\
 & + [T_n / (T_{вз} - T_n)] \times \\
 & \times (\bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_n]_{\text{ч.л.п}}) \}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Вероятность электропоражения в случае правого граничного положения интервала касания на основе той же формулы будет определяться в виде:

$$\begin{aligned}
 & P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_n]_{\text{гран.п}} = \\
 & = P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_{кас}, T_n]_{\text{гран.п}} // \text{полн.п} + \\
 & + P(\text{ЭП})[T_{вз}, T_n]_{\text{гран.п}} // \text{пер.л} = \\
 & = (P(\text{НапрОПЧ})_T / K_{Твз}) \times \\
 & \times \{ [(T_{кас} - T_n) / (T_{вз} - T_n)] \cdot P(\text{ЭП/Вкл})[T_n] + \\
 & + (T_n / (T_{вз} - T_n)) \times \\
 & \times (\bar{P}(\text{ЭП/Вкл})[T_n]_{\text{ч.п.п}}) \}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Приводимые формулы имеют рассмотренные выше топологические характеристики. При их использовании каждая из формул характеризуется номером электроустановки, являющейся источником опасной ситуации, номером человека, попавшего в опасную ситуацию, и номером аппарата защиты, защищающего человека в этой ситуации.

При использовании формул предполагаются известными значения длительностей интервалов включения $T_{вз}$ и касания $T_{кас}$, а также факты наличия граничных положений интервала $T_{кас}$ и их виды.

Считаются также известными значения вероятностей появления напряжения на открытых проводящих частях за период времени T и значения коэффициентов $K_{Твз}$, учитывающих количество включений электроустановки за период времени T .

Значение T_n определяется вне этих формул в результате процедуры, предусматривающей соотношение каждой электроустановке (каждому источнику опасной ситуации) соответствующего аппарата защиты и определение времени его срабатывания.

На *втором уровне* моделирования электропоражений осуществляется суммирование «опасностей» электропоражений человека, имеющих место при всех его «однокасательных» взаимодействиях с электроустановками объекта.

При этом в пределах одного интервала включения электроустановки может иметь место *несколько касаний*, отличающихся, в общем случае, их видом (внутреннее или граничное положение интервала касания), количеством и длительностью. В пределах цикла работы объекта может быть *несколько интервалов включения* электроустановок, отличающихся, в общем случае, их количеством и длительностью. Возможны также различные режимы включения электроустановок («ручной» или автоматический).

Необходимо также учитывать, что электропоражения при защите системой зануления обусловлены не только непосредственными касаниями человеком открытых проводящих частей некоторой электроустановки, но и одновременными опосредованными касаниями других электроустановок объекта. При моделировании электропоражений на *втором уровне* может быть также учтена возможность отказа системы защиты.

Рассмотрим некоторый интервал включения некоторой электроустановки. Пусть электроустановка имеет номер j ($j = 1, \dots, M$), а выделенный интервал – номер v ($v = 1, \dots, V$).

При защите системой зануления при рассмотрении касания некоторой электроустановки необходимо также учитывать одновременные опосредованные касания человеком других электроустановок. Выделяют четыре варианта соотношений между

интервалом касания j -й электроустановки $T_{касj}$ и интервалами включения других электроустановок $T_{вэл}$ ($l = 1, \dots, M; l \neq j$), которых человек касается опосредованно: 1) интервал касания не пересекает интервал включения, 2) интервал касания занимает внутреннее положение по отношению к интервалу включения, 3) интервал касания частично пересекает интервалу включения, 4) интервал касания занимает граничное положение по отношению к интервалу включения.

Предполагается, что такие соотношения устанавливаются человеком, производящим моделирование, на основе анализа взаимодействий людей и электроустановок на объекте. Такой анализ может быть выполнен с помощью мысленного или графического наложения временной диаграммы касаний данной (j -й) электроустановки на диаграммы включений всех других ($l - x$) электроустановок объекта ($l = 1, \dots, M; l \neq j$). Будем называть такую совокупность совмещенных диаграмм «картиной опосредованных касаний».

С помощью такой «картины» могут быть проиллюстрированы четыре отмеченных выше варианта возможных соотношений между интервалом касаний и интервалами включений (рис. 2).

Результаты расчетов вероятностей электропоражений при «однокасательных» взаимодействиях i -го человека с j -той электроустановкой удобно представить в виде вектора

$$P(\text{ЭП})_{ijvk}^{\text{одн}} = \{ P(\text{ЭП})_{i1vk}^{\text{одн}}, \dots, P(\text{ЭП})_{ijvk}^{\text{одн}}, \dots, P(\text{ЭП})_{iMvk}^{\text{одн}} \}. \quad (9)$$

Векторы (9) должны быть построены для каждого из касаний человека в пределах цикла. Положим, что общее количество таких касаний равно $N_{касij}$. Для описания всей совокупности вероятностей удобно использовать матрицу вероятностей электропоражений при «однокасательных» взаимодействиях человека в пределах цикла $P(\text{ЭП})_{ijцикл}^{\text{одн}}$. Ее строки будут образованы векторами $P(\text{ЭП})_{ijvk}^{\text{одн}}$, а размерность будет определяться как $N_{кас} \times N$.

Для подсчета рассматриваемых вероятности электропоражения человека при определенном касании j -й электроустановки примем *допущение* о том, что на электроустановках, которых человек касается непосредственно и опосредованно, может произойти не более одного электропоражения.

Такое допущение позволяет определить искомую вероятность электропоражения в указанной группе электроустановок в виде суммы вероятности электропоражения при непосредственном касании некоторой электроустановки и всех вероятностей, обусловленных косвенными касаниями

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТЕ ПРИ ЗАЩИТЕ СИСТЕМОЙ ЗАНУЛЕНИЯ

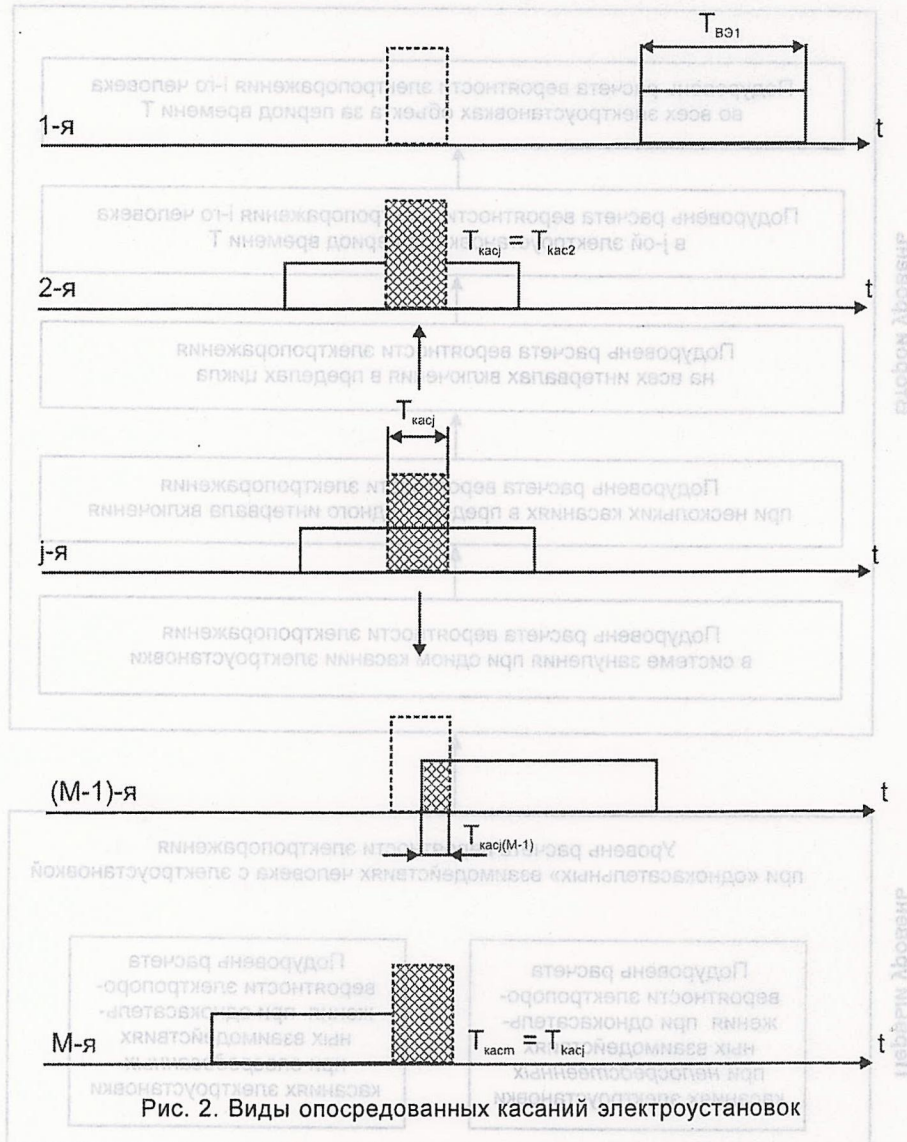


Рис. 2. Виды опосредованных касаний электроустановок

других электроустановок. Пусть, для определенности, рассматривается k -е касание человека j -й электроустановки на v -м интервале включения. Тогда вероятность электропоражения при этом касании при наличии системы зануления будет определяться в виде

$$P(\text{ЭП})_{ijvk}^{\text{зан}} = P(\text{ЭП})_{ijvk}^{\text{одн.н}} + \sum_{l=1, l \neq j}^M P(\text{ЭП})_{ilvk}^{\text{одн.оп}} \quad (10)$$

В этой формуле символами «одн.н» и «одн.оп» обозначаются однократные непосредственные и опосредованные касания соответственно.

Все вероятности в правой части формулы представляют собой вероятности $P(\text{ЭП}) [T_n, T_{\text{кас}}, T_{\text{вз}}]$ технология определения которых рассмотрена выше.

На v -м интервале включения j -й электроустановки человек, в общем случае, может иметь несколько прикосновений к открытым проводящим частям этой электроустановки. Пусть количество таких прикосновений равно K_{vj} .

Учитывая относительную редкость электропоражений людей на производственных объектах, примем *допущение* о том, что на рассматриваемом интервале включения электропоражение человека может произойти не более чем при одном касании. В этом случае электропоражения от всех возможных касаний на интервале образуют полную группу событий. Тогда вероятность электропоражения i -го человека в j -й электроустановке на рассматриваемом (v -ом) интервале включения при всех имеющихся касаниях с учетом связи электроустановок по зануляющему проводу может быть определена как сумма вероятностей электропоражений

$$P(\text{ЭП})_{ijv}^{\Sigma \text{кас}} = \sum_{k=1}^{K_{vj}} P(\text{ЭП})_{ijvk}^{\text{зан}} \quad (11)$$

Примем далее *допущение* о том, что на всех интервалах включения j -й электроустановки в пределах цикла может произойти не более одного электропоражения. Пусть число таких интервалов



Рис. 3. Уровни и подуровни моделей электропоражений

равно V_j . Тогда вероятность электропоражения i -го человека в j -й электроустановке на всех интервалах включения (или на протяжении цикла) с учетом связи электроустановок по зануляющему проводу может быть определена как сумма вероятностей электропоражений на каждом из интервалов:

$$P(\text{ЭП})_{ij}^{\text{цикл}} = \sum_{v=1}^{V_j} P(\text{ЭП})_{ijv}^{\Sigma \text{кас}} \quad (12)$$

Последовательное использование формул (10) и (11) позволяет подсчитать вероятность электропоражения i -го человека за цикл при касаниях им определенной (j -й) электроустановки.

На основе полученной формулы может быть подсчитана вероятность электропоражения i -го человека в j -й электроустановке за период T (обычно принимаемый равным одному году). При этом

учитывается, что значение вероятности $P(\text{ЭП})_{ij}^{\text{цикл}}$ не зависит от номера цикла.

При подсчете вероятности принимается допущение о том, что электропоражение возможно не более, чем в одном из циклов периода T . Тогда искомая вероятность будет определяться как сумма вероятностей, определенных для каждого цикла

$$P(\text{ЭП})_{ij}^T = N_{\text{ц}} \cdot P(\text{ЭП})_{ij}^{\text{цикл}} \quad (13)$$

Исходя из относительной редкости электропоражений, примем допущение, что электропоражение человека за период T может произойти только от одной электроустановки. Тогда вероятность электропоражения i -го человека на объекте за период T может быть определена по формуле

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТЕ ПРИ ЗАЩИТЕ СИСТЕМОЙ ЗАНУЛЕНИЯ

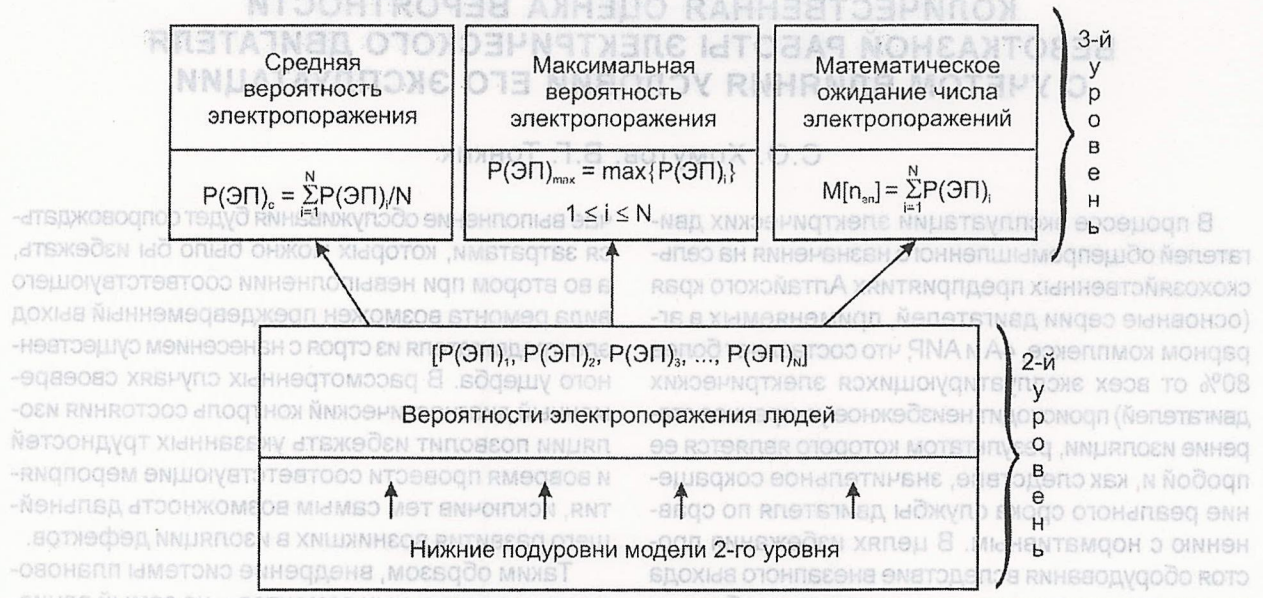


Рис. 4. Моделирование электробезопасности на третьем уровне

$$P(\text{ЭП})_i^T = \sum_{j=1}^N P(\text{ЭП})_{ij}^T \quad (14)$$

Таким образом, в рамках второго уровня моделей выделяется ряд подуровней. Образованная иерархия моделей на первом и втором уровнях приведена на рисунке 3.

Рассмотрим *третий уровень* иерархии моделей электропоражений человека на объекте.

На этом уровне формируется один показатель, интегрально характеризующий состояние электробезопасности на объекте. Используются три варианта таких показателей: 1) средняя вероятность электропоражения $P(\text{ЭП})_c$, 2) максимальная вероятность электропоражения $P(\text{ЭП})_{\max}$, 3) математическое ожидание числа электропоражений $M[n_{\text{эп}}]$ (рис. 4).

Последний из показателей подсчитывается на основе введения совокупности случайных величин, каждая из которых определяет число возможных электропоражений работника на объекте. В силу редкости электропоражений принимается допущение, что каждая из таких величин может принимать только два значения – 0 или 1.

Согласно теореме сложения математических ожиданий [4], математическое ожидание суммы рассматриваемых величин будет представлять собой сумму математических ожиданий введенных величин. В данном случае такая сумма будет иметь вид суммы вероятностей электропоражений людей на объекте, т.е.

$$M[n_{\text{эп}}] = \sum_{i=1}^N P(\text{ЭП})_i \quad (15)$$

Таким образом, разработана многоуровневая иерархическая система математических моделей электробезопасности людей на объекте при защите системой зануления. Совокупность таких моделей позволяет сформировать алгоритм расчета опасности электропоражений на объекте.

Нами разработана также технология моделирования электробезопасности, учитывающая возможность отказа элементов системы зануления.

Литература

1. Шуцкий В.И. Безопасность при эксплуатации электротехнических систем: Учеб. пособие / В.И. Шуцкий, А.И. Сидоров. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. 282 с.
2. Якобс А.И. Электробезопасность в сельском хозяйстве / А.И. Якобс, А.В. Луковников. М.: Колос, 1981. 239 с.
3. Якобс А.И. Оценка эффективности устройств защитного отключения / А.И. Якобс, В.Д. Шаматава // Электричество. 1983. №6. С. 6–12.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 6-е изд. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
5. Дробязко О.Н. Метод автоматизированного проектирования систем комплексной электробезопасности на сельскохозяйственных объектах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 1994. 21 с.
6. Никольский О.К. Основы создания оптимальных систем обеспечения электробезопасности при эксплуатации электроустановок сельскохозяйственного назначения напряжением 380 В: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Барнаул, 1978. 45 с.
7. Полонский А.В. Повышение электробезопасности электроустановок агропромышленного комплекса: Автор. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2000. 20 с.