

Введение

Одной из самых характерных черт современной науки является все более ускоряющийся темп ее движения. Суждение об этом свойстве развития науки, встречающееся во множестве работ фундаментального, прикладного и гуманитарного характера, основано, как правило, на логическом анализе фактов и явлений, на исторических сопоставлениях и практическом опыте ученых и специалистов многих отраслей знаний. Уже в XVII веке великий Ньютон отмечал коммулятивный характер научных знаний и экспоненциальное развитие самой науки.

Экспертами, занимающимися анализом научно-технического прогресса, установлено, что общий характер развития науки в XX веке существенно определялся тремя составляющими классической триады Н-Т-О (наука — техника — образование), исторической целью которой, как очевидно, является удовлетворение всесторонних духовных и материальных потребностей человеческого общества.

Сравнивая темпы роста (например, выработки электроэнергии) с технологической оснащенностью основных ее процессов (генерация, преобразование, передача и потребление электроэнергии), развитием энергетической науки, подготовкой и обучением инженерных кадров, мы можем сделать определенное заключение о характере развития научно-технического прогресса в данной отрасли. Например, соотношение

$$\frac{dT}{dt} > \frac{dH}{dt} > \frac{dO}{dt},$$

имеющее место в электроэнергетике, наводит нас на мысль об отставании развития данной отрасли науки и подготовки кадров от потребности практики и производства. Вследствие чего на общем фоне увеличения выработки и потребления электроэнергии не улучшаются качественные показатели энергетической отрасли (себестоимость продукции, надежность, экология, техногенная безопасность и т. д.).

Можно утверждать, что наиболее оптимальным для современного этапа развития отечественной науки и образования является соотношение

$$\frac{dH}{dt} > \frac{dO}{dt} > \frac{dT}{dt}^*.$$

Изложенный подход к определению тенденции развития науки, техники и образования требует рассмотрения каждого из этих составляющих.

Наука. Современная наука чрезвычайно дифференцирована. Эта дифференциация продолжается, она естественна и необходима для углубления познаний. Научный эксперимент требует сложнейшего оборудования, что привело к индустриализации научных исследований. Углубленность в область специальных наук затрудняет взаимопонимание ученых, возникает профессиональная терминология, непонятная порой даже близким по профилю специалистам. В настоящее время вряд ли существует математик или физик, знающий все разделы своих научных дисциплин. Специализация принесла огромную пользу,

* Здесь не следует понимать в буквальном смысле взятие производной. Это неравенство устанавливает лишь соотношение скоростей изменения трех основных факторов: Н-Т-О.

но вызвала и большие трудности. Главная из них — сложность всестороннего рассмотрения факторов, их объединение и интерпретация. Изучаемые в настоящее время процессы, протекающие в техногенной сфере, учитывают весьма ограниченное число переменных, не превышающих несколько десятков. Здесь целесообразно использование детерминистических подходов и дифференциальных уравнений. При описании сложных антропогенных явлений, где необходимо учитывать сотни или тысячи факторов, требуется применять современные методы (например, информационные технологии). В отдельных случаях при прогнозировании того или иного явления задача решается в условиях нестохастической неопределенности (отсутствия информации) путем использования интеллектуальных систем.

Сегодня мы еще вынуждены объяснять принципиальные свойства живой материи особыми «биологическими законами», которые искусственно оторваны от общих законов природы и не имеют строгих научных формулировок. Поэтому узкоспециальная ограниченность в современной науке не имеет перспективы.

Фундаментальные представления о строении вещества, об энергетических и информационных процессах, о сущности развития, об отличии живого от неживого следует пересмотреть с позиции единства и целостности мира, например, используя принципы квантовой физики. Современная наука требует не только накопления знаний в специальных областях, но и интеграции на основе концепции, которая сохраняла бы преемственность и открывала перспективы, устанавливая взаимосвязь между структурой, свойствами и организацией.

Тенденция современной науки к интеграции путем взаимного проникновения, как известно, приводит к рождению новых научных дисциплин и направлений. Процессу интеграции способствуют следующие факторы: возникает множество проблем, для решения которых требуются знания и методы различных, иногда весьма отдаленных, наук; математика входит в описательные и гуманитарные науки, создавая основу развития и новые перспективы; в свою очередь описательные и гуманитарные науки ставят перед математикой новые задачи; происходит индустриализация науки на основании появления в последние десятилетия новых информационных технологий на базе массового применения персональных компьютеров и сетей Интернет; стираются методологические различия между естественными, техническими и гуманитарными науками.

Техника. Возросшие потребности человечества нельзя в целом удовлетворить, если технический прогресс пойдет традиционным путем, которым он шел до середины XX века. Основным недостатком машинной цивилизации является низкий уровень управляемости технологическими процессами (будь то в энергетике или машиностроении), отстающий от требований практики сегодняшнего дня и совершенно недопустимый для завтрашнего. Чем выше энергетический уровень, тем ниже организованность, управляемость и информативность. Коэффициент полезного действия традиционных технических устройств недопустимо мал. Чрезвычайно низок коэффициент преобразования материалов: относительное количество вещества, которое непосредственно участвует в производственных функциях человеко-машинных систем, на 2-3 порядка ниже, чем в биоклетке. Кроме того, современное производство включает множество процессов, характер связи между которыми изменяется в зависи-

мости от случайных факторов (флуктуаций). Очень многие технологические процессы не изучены или мало изучены. Часть физических процессов здесь протекает в сфере, мало доступной не только для эксплуатационного и диспетчерского контроля, но и для научного и экспериментального исследования. В этой связи проникновение идей искусственного интеллекта с его мощными техническими средствами радикально изменяет информационные возможности технологий. Оперативное вмешательство в быстропротекающие процессы уже не может ограничиваться медлительностью традиционного анализа и расчетов. Программное управление технологиями стало обычной практикой. Примером тому могут служить экспертные системы, позволяющие в автоматизированном режиме решать класс задач многокритериального анализа, прогнозирования и оптимального распределения ресурсов. Многие виды производственной деятельности человека, включая разработку новых устройств, проектирование и конструирование сооружений, управление сложными агрегатами, внутри которых происходят быстропротекающие и слабоуправляемые процессы (например, в атомной энергетике) — частично перешли и продолжают переходить из области приобретенного уникального опыта высококвалифицированного персонала в область массовых технологий, организации и управления. Созданный человечеством к началу XXI века уникальный мир техносферы располагает огромной энергетической и информационной базой и связан с влиянием тысяч, а иногда и миллионов детерминированных и случайных факторов. Управление такой техносферой требует выработки новых концептуальных подходов и создания методологических основ профессионального инженерного и гуманитарного образования.

Образование. В процессе обучения человек проходит различные этапы, в том числе этап основной деятельности, когда, обучаясь в университете, студент получает профессиональное образование. Сегодня образование является одной из самых острых проблем современности. Оставляя в стороне социально-экономическую ситуацию, приведшую к кризису образования в России, отметим, что сама технология обучения не соответствует требованиям современного общества. Классический путь обучения по методу «делай, как я» до недавнего времени оправдывал себя, пока объем теоретических знаний, компетенций и практических навыков, который требовался для плодотворной профессиональной деятельности, был не очень велик. При современных темпах развития экономики традиционный путь обучения оказался неприемлемым.

Сейчас много говорят о гигантском потоке информации, который обрушивается на человека с первого дня рождения, о взрыве «мегабитной бомбы». Разобраться во всем информационном хаосе, отсеяв его случайные помехи и «шумы», возможно путем систематизации информации, формирования критериев, позволяющих провести целенаправленный анализ, воспринять и закрепить необходимые знания, отбросив при этом случайное и ненужное, создав единый категорийный аппарат знаний, понятный для специалистов различных направлений. С этой точки зрения представляется необходимым радикальное реформирование системы обучения и подготовки кадров и обоснование новых информационных технологий вузовского образования.

Материал, представленный в монографии, отражает широкий спектр проведенных исследований и результатов работ по актуальным проблемам в области техногенной безопасности электроустановок напряжением до 1000 В, научным и практическим аспектам жизнедеятельности человека и окружающей среды.

Рассмотрены процессы, приводящие к возникновению таких опасных ситуаций как электропоражения людей, аварии систем электроснабжения потребителей, пожары, вызванные действием электрического тока. Приведены и обоснованы математические модели человеко-машинной системы, компонентами которой являются «электротехнический персонал», «электроустановка» и «среда». Впервые установлены количественные причинно-следственные связи между ними и целесообразность введения функций управления и оптимизации техногенных рисков в многокритериальной среде. Рассмотрены экспериментальные и теоретические проблемы, связанные с дальнейшим развитием теории безопасности электроустановок.

Авторы не ставили перед собой задачу обобщения и системологического анализа проблемы «наука — техника — образование», сознавая, что решение подобной задачи требует проведения и осмысления многолетних междисциплинарных исследований фундаментальных, прикладных и гуманитарных наук.

Раздел первый

Общие вопросы техногенной безопасности электроустановок

Глава 1. Анализ опасности поражения человека электрическим током

1.1. Классификация электроустановок и анализ возникновения травмоопасных ситуаций

Классификация электроустановок и помещений, в которых они эксплуатируются, по признакам, влияющим на опасность поражения человека током, является важным мероприятием по снижению электротравматизма.

Выделение электроустановок, имеющих в определенной мере одинаковые признаки электробезопасности, в отдельные группы позволяет разработать оптимальные требования к их конструкциям, защитным условиям эксплуатации. Кроме того, условия эксплуатации также влияют на опасность поражения человека электрическим током, поэтому их классификация более эффективная техническая мера. В основу указанных классификаций положены признаки, влияющие на опасность поражения человека электрическим током. Основными признаками являются: напряжение электроустановки, ток замыкания на землю, режим работы сети, режим нейтрали сети, состояние изоляции токоведущих частей электроустановки и факторы, влияющие на состояние указанной изоляции (температура, влажность среды и т. п.), а также вероятность включения тела в цепь тока. По напряжению различаются электроустановки до 1000 В и свыше 1000 В. По току замыкания на землю различают электроустановки с большими токами замыкания на землю, в которых ток однополюсного глухого замыкания на землю превышает 500 А, и электроустановки с малыми токами замыкания на землю, в которых ток однофазного глухого замыкания на землю равен или меньше 500 А.

Режим нейтрали источника питания сети следует выбирать с учетом номинального напряжения, протяженности сети и числа подключенных потребителей. Последние два фактора влияют на сопротивление изоляции сети относительно земли, на величину тока замыкания на землю и в конечном итоге на величину тока, проходящего через тело человека.

Электроустановки напряжением до 1000 В широко применяются на производстве и в быту. Условия работы электрооборудования напряжением до 1000 В не исключают контакта с токоведущими частями, поэтому при выборе режима нейтрали сети следует учитывать возможность прикосновения к фазе.

В сети с изолированной нейтралью значение тока замыкания на землю и тока, проходящего через тело человека при прикосновении к фазе, определяется сопротивлением изоляции и емкостью сети относительно земли. Как было показано ранее, значение тока, проходящего через тело человека, в этом случае при высоких сопротивлениях фаз может не превышать порогового неотпускающего тока. При сопротивлениях в несколько десятков килоом ток, проходящий через тело человека, опасен, однако предотвращение электротравмы возможно.

Следовательно, при отсутствии замыканий на землю в сети с нейтралью, емкостью и высоким сопротивлением изоляции ($|Z| > 10$ кОм) сравнительно

безопасны. Если сопротивление изоляции мало и емкость велика, человек, касающийся фазы, попадает под фазное напряжение, и ток, проходящий через его тело, достигает опасной величины. Такая сеть опасна и при нормальном режиме работы.

При глухом замыкании на землю исправные фазы сети с изолированной нейтралью оказываются под напряжением сети, близким к линейному. Человек, прикоснувшийся к исправной фазе, попадает почти под линейное напряжение, и значение тока достигает смертельно опасной величины — нескольких сотен миллиампер. В сети с глухозаземленной нейтралью человек, касающийся фазы, в любом случае оказывается под фазным напряжением. Таким образом, сеть с глухозаземленной нейтралью при замыкании на землю менее опасна, чем с изолированной нейтралью.

С учетом отмеченных особенностей сетей напряжением до 1000 В и различных режимов нейтрали следует заземлять нейтраль в сетях с невысоким сопротивлением изоляции и большой емкостью. Действующие ПУЭ предписывают заземлять нейтраль в четырехпроводных сетях, т. к. сопротивление изоляции нейтрального провода не может быть достаточно высоким: этот провод имеет большую длину и большее число присоединений, чем фазные провода.

Эксплуатация четырехпроводных сетей напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью ПУЭ запрещена. Однако в ряде случаев четырехпроводные сети передвижных электроустановок составляют исключение и работают с изолированной нейтралью. Электроустановки напряжением выше 1000 В представляют значительную опасность при прикосновении к фазе независимо от режима нейтрали. Следовательно, для предотвращения электротравм следует предусматривать мероприятия, в первую очередь исключающие возможность не только прикосновения, но и приближения к токоведущим частям, находящимся под напряжением. Что касается режима нейтрали сети, то в электроустановках 6, 10 и 35 кВ нейтрали или совсем не заземляются при малом токе замыкания на землю, или заземляются через реактивную (дугогасящую) катушку для ограничения величины тока замыкания на землю.

Принятый режим нейтрали в сетях 110 кВ и выше (глухое заземление нейтрали) в еще большей степени обусловлен техническими соображениями.

Наиболее важное из них — создание стабильности напряжения фаз относительно земли, так как это позволяет рассчитывать изоляцию обмоток и других токоведущих частей электроустановок не на линейное, а на фазное напряжение.

Помещения, в которых находятся электроустановки, классифицируются в зависимости от параметров окружающей среды, воздействующих на сопротивление изоляции и на сопротивление тела человека, а также в зависимости от факторов, влияющих на возникновение условий поражения.

Сухими помещениями называются такие помещения, в которых относительная влажность не превышает 60 %. Влажные помещения — это помещения, в которых относительная влажность воздуха больше 60 %, но не превышает 75 %. В таких помещениях возможно кратковременное выделение паров и конденсирующейся влаги в небольших количествах.

Сырыми помещениями называются такие помещения, в которых относительная влажность воздуха близка к 100 %. В таких помещениях стены, пол, потолок и предметы, находящиеся в помещении, покрыты влагой. Жаркими

помещениями называются такие помещения, в которых температура воздуха длительное время превышает $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Повышенная температура воздуха в помещении ускоряет старение изоляции, что приводит к снижению ее сопротивления и даже к разрушению. При повышенной температуре воздуха уменьшается сопротивление тела человека вследствие выделяющегося пота. По этим причинам температура воздуха в помещении учитывается при решении вопросов электробезопасности. Помещения с токопроводящим полом представляют существенную опасность при эксплуатации электроустановок, так как в этих помещениях отсутствует переходное сопротивление между телом человека и землей. Токопроводящий пол (металлический, земляной, железобетонный, кирпичный и т. п.), кроме того, способствует условиям поражения.

То же наблюдается при одновременном прикосновении к имеющим гальваническую связь с землей корпусам технологического оборудования (металлическим конструкциям зданий и сооружений) и к частям электрооборудования, нормально или случайно находящимся под напряжением.

Пыльными помещениями называются помещения, в которых выделяется технологическая пыль в количестве, достаточном для проникновения под кожу электрооборудования и создания электрической цепи для утечки опасных токов. Пыль может быть также непроводящей.

Помещения с химически активной средой — это помещения, в которых содержатся газы, пары или образуются отложения, разрушающие изоляцию или токоведущие части электрооборудования.

Таким образом, для помещений можно выделить следующие признаки повышенной опасности: токопроводящие полы; сырость (относительная влажность воздуха выше 75%); токопроводящая пыль; повышенная температура воздуха (выше $30\text{ }^{\circ}\text{C}$); возможность одновременного прикосновения к корпусам электрооборудования, имеющим соединение с землей, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования или токоведущим частям — с другой.

Следует также выделить признаки особой опасности: особая сырость (относительная влажность воздуха приближается к 100%); активная химическая среда. По этим признакам помещения разделяются на помещения с повышенной опасностью, и помещения без повышенной опасности.

Открытые или наружные электроустановки следует приравнять к электроустановкам, эксплуатирующимся в особо опасных помещениях, так как в зависимости от условий погоды возможны повышенная температура, проводящий грунт и особая сырость. Кроме того, по доступности электрооборудования следует различать следующие помещения:

1) рамкнутые электротехнические помещения, в которых установлено электрооборудование, не требующее постоянного надзора и потому находящееся под замком. В этих помещениях лишь для незначительного ремонта и т. п. находится электротехнический персонал. Внимание персонала, находящегося в таких помещениях в течение короткого времени, не будет ослаблено;

2) электротехнические помещения — помещения или их отгороженные части, доступные только для электротехнического персонала, в которых установлено электрооборудование, требующее постоянного присутствия обслуживающего персонала. Так как люди находятся в этих помещениях длительно, то возможно ослабление внимания и, как следствие, контакт с элементами электроустановки, находящимся под опасным напряжением;

3) производственные помещения — помещения, в которых длительный контакт с электрооборудованием (электроприводами станков, осветительными устройствами и т. п.) имеют лица неэлектротехнических специальностей;

4) конторские и бытовые помещения (жилые, столовые и т. п.).

В зависимости от вида электроустановки, номинального напряжения, режима нейтрали сети, условий среды помещения и доступности электрооборудования необходимо применять определенный комплекс защитных мер, обеспечивающих достаточную безопасность.

В соответствии с ПУЭ для защиты людей от поражения электрическим током должна применяться, по крайней мере, одна из следующих защитных мер: заземление, зануление, защитные отключения, малые напряжения, разделительные трансформаторы, выравнивание потенциалов, двойная изоляция.

Перечисленные защитные меры не являются универсальными. Их эффективность зависит от условий поражения, типа электроустановки и режима ее работы. Поэтому в следующей главе более подробно рассмотрены защитные свойства применяемых в электроустановках защитных мер.

1.2. Условия поражения человека электрическим током

Условия поражения возникают при прикосновении человека к точкам электроустановки с различными потенциалами или к точке, потенциал которой отличен от потенциала земли. Поэтому напряжение, которое в этом случае прикладывается к телу человека, принято называть напряжением прикосновения.

С учетом материала, изложенного в *главе 2*, анализ опасности поражения человека в электроустановках сводится к определению значения тока в цепи тела человека или напряжения прикосновения. Однако задача эта нелегкая, поскольку человек может иметь контакт с различными элементами электроустановки, напряжение между которыми зависит от ее параметров, режима работы и условий эксплуатации.

Из литературы известно, что существует четыре условия поражения (схемы включения) человека в электроустановках: двухполюсное (двухфазное) прикосновение, когда человек касается двух полюсов электроустановки; однополюсное (однофазное) прикосновение, когда человек, имея гальваническую связь с землей, касается одного полюса электроустановки; прикосновение к нетоковедущим частям электроустановок, оказавшихся под напряжением в результате повреждения изоляции (прикосновения к корпусу с поврежденной изоляцией); включение между двумя точками земли (грунта), находящимися под разными потенциалами (включение под напряжение шага).

Основными причинами возникновения условий поражения человека электрическим током являются:

1) случайное прикосновение человека к токоведущим частям электроустановки;

2) возникновение аварийных режимов в электроустановках;

3) невыполнение требований ПУЭ;

4) нарушение требований правил эксплуатации электроустановок.

Следует отметить, что второе и третье условия поражения не имеют принципиальной разницы. Это объясняется тем, что наличие прямого контакта человека с токоведущей частью или косвенного (через токопроводящий корпус электроустановки) не будет отражаться на значении тока в цепи тела человека.

Следовательно, при определении степени опасности электроустановок рассмотрение этих вопросов можно объединить. При изучении причин возникновения условий поражения электрическим током следует различать прямой контакт человека с токоведущей частью электроустановки и косвенный. Прямой контакт возникает, как правило, в результате нарушения правил эксплуатации электроустановок, а косвенный — в результате пробоя изоляции. Из этого также следует, что для предотвращения или устранения данных условий поражения может быть несколько технических и организационных защитных мер.

Дальнейшая задача анализа условий поражения заключается в определении тока в цепи тела человека (или напряжения прикосновения) для различных условий поражения в электроустановках, нашедших применение в машиностроении, и сравнении его значения с допустимыми величинами.

Наибольшую опасность представляет двухполюсное (двухфазное) прикосновение. При данном условии поражения человек подключается к сети, эквивалентной электрической нагрузке, поэтому напряжение прикосновения равно рабочему напряжению электроустановки, а в трехфазной сети — линейному напряжению. Статистика электротравм показывает, что данное условие поражения, возникает довольно редко, поэтому в теории электробезопасности оно не рассматривается в общем виде, а ограничивается анализом конкретных примеров.

Наибольшее число электротравм происходит при однополюсном прикосновении человека к токоведущим частям. Электротравмы с летальным исходом при этом условии поражения составляют 70–80 %. Причем большинство из них происходит в сетях 380/220 В. Много электротравм происходит при возникновении аварийных режимов работы электроустановок, поэтому такие условия поражения рассмотрим подробно.

1.2.1. Анализ условий поражения человека при работе на электроустановках переменного тока

Трехфазные электрические сети по опасности поражения человека, прикоснувшегося к фазе, делятся на три типа: сети с изолированной нейтралью источника питания; сети с глухозаземленной нейтралью; сети с нейтралью, заземленной через компенсирующее устройство.

Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль генератора или трансформатора, присоединенная к заземляющему устройству непосредственно или через малое сопротивление.

Изолированной нейтралью называется нейтраль генератора или трансформатора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через аппараты, имеющие большое сопротивление.

Сети всех трех типов могут быть приведены к одной расчетной схеме замещения, которая приведена на *рис. 1.1*.

На схеме приняты следующие обозначения:

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ — фазные напряжения источника питания;

\dot{U}_0 — напряжение нейтральной точки источника питания относительно земли;

Y_A, Y_B, Y_C — проводимости изоляции фаз относительно земли;

I_A, I_B, I_C — токи, стекающие на землю через проводимости изоляции фаз относительно земли (фазные токи утечки);

Y_0 — проводимость нейтрали относительно земли;
 G_h — проводимость тела человека;
 Y_n — переходная проводимость между телом человека и землей;
 I_h — ток в цепи тела человека.

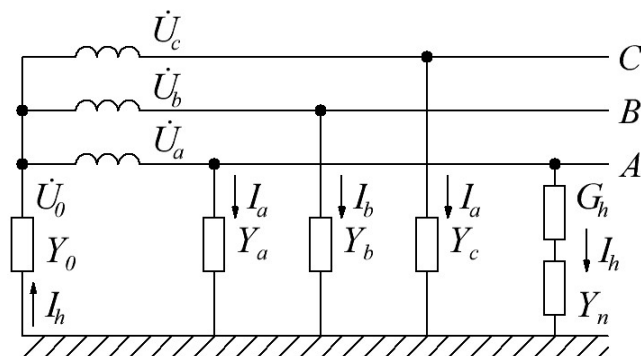


Рис. 1.1. Схема замещения трехфазной электрической сети

Проводимость фаз относительно земли обусловлена несовершенством изоляции токоведущих частей (проводов обмоток, шин и т. п.) электроустановки.

Изоляция, как известно, выполняется из реальных диэлектриков, удельное сопротивление которых имеет конечную величину. Кроме того, в процессе эксплуатации электроустановок изоляция стареет, увлажняется; оголенные части покрываются токопроводящей пылью. Все это вызывает увеличение проводимости фаз относительно земли. Для расчета установившегося тока в цепи человека распределенные параметры изоляции сети относительно земли можно заменить сосредоточенными. В общем случае проводимости фаз относительно земли состоят из активной и емкостной составляющих:

$$\begin{aligned}
 Y_a &= g_a + jb_a = \frac{1}{r_a} + j\omega C_a; \\
 Y_b &= g_b + jb_b = \frac{1}{r_b} + j\omega C_b; \\
 Y_c &= g_c + jb_c = \frac{1}{r_c} + j\omega C_c,
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

где r_a, r_b, r_c — активные сопротивления изоляции соответственно фаз А, В, С относительно земли;

C_a, C_b, C_c — емкости фаз относительно земли;

ω — угловая частота.

Определим ток, проходящий через тело человека (в цепи тела человека) — I_h , напряжение прикосновения — U_h при прикосновении к фазе А.

На основании первого закона Кирхгофа и в соответствии с рис. 1.1 запишем:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c + \dot{I}_h.
 \tag{1.2}$$

Выразив токи в выражении (1.2) через напряжения и проводимости, получим:

$$\dot{U}_0 \dot{Y}_0 = (\dot{U}_a - \dot{U}_0)(Y_a + Y_{h3}) + (\dot{U}_b - \dot{U}_0)Y_b + (\dot{U}_c - \dot{U}_0)Y_c, \quad (1.3)$$

где Y_{h3} — эквивалентная проводимость участка цепи тела человека, определяемая по формуле:

$$\frac{G_h Y_n}{G_h + Y_n} = \frac{G_h}{1 + \frac{G_h}{Y_n}}. \quad (1.4)$$

Учитывая, что в симметричной трехфазной сети:

$$\dot{U}_a = U, \quad \dot{U}_b = a^2 U, \quad \dot{U}_c = a U. \quad (1.5)$$

Из выражения (1.3) найдем:

$$\dot{U}_0 = U \frac{Y_a + a^2 Y_b + a Y_c + Y_{h3}}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_0 + Y_{h3}}, \quad (1.6)$$

где U — модуль фазного напряжения источника питания сети;
 a — фазный множитель, определяемый по формулам:

$$\left. \begin{aligned} a &= -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^2 &= -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

В соответствии со вторым знаком Кирхгофа напряжение прикосновения будет:

$$\dot{U}_h = \dot{U}_a - \dot{U}_0 - \dot{U}_\Pi = \dot{U}_{\phi,3}, \quad (1.8)$$

где U_n — падение напряжения на переходном сопротивлении между телом человека и землей;

$U_{\phi,3}$ — напряжение фазы относительно земли.

Решив совместно выражения (1.6) и (1.8), получим:

$$\dot{U}_h = U \alpha \frac{Y_b(1 - a^2) + Y_c(1 - a) + Y_0}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_0 + Y_{h3}}, \quad (1.9)$$

где $\alpha = 1 - \frac{U_\Pi}{U} \leq 1$ — коэффициент напряжения прикосновения.

Из выражения (1.9) видно, что напряжение прикосновения определяется параметрами сети, режимом ее работы, сопротивлением тела человека и переходным сопротивлением в цепи тела человека. Причем переходное сопротивление играет существенную роль в перераспределении напряжений в сети. При $Y_n \ll Y_0$, G_h значение $\alpha \ll 1$, следовательно, напряжение прикосновения будет близким к нулю. При малом переходном сопротивлении коэффициент напряжения прикосновения будет стремиться к единице, а к телу человека будет приложено наибольшее напряжение. Следовательно, переходное сопротивление обладает защитными свойствами.

Формулы и выводы будут верны, если вместо переходного сопротивления между телом человека и землей принять сопротивление между телом

человека и фазой. Защитные свойства переходного сопротивления в цепи тела человека широко используются при решении вопросов электробезопасности. В частности, эти свойства применяются при разработке защитных средств (диэлектрических перчаток, бот, ковриков, штанг и т. п.).

При дальнейшем анализе будем исходить из худших условий, т. е. примем: $R_{II} = \frac{1}{Y_{II}} = 0$, тогда $Y_{h_0} = G_h$, $\alpha = 1$, а выражение (1.9) будет иметь вид:

$$\dot{U}_h = U \frac{Y_b(1-a^2) + Y_c(1-a) + Y_0}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_0 + G_h}. \quad (1.10)$$

При необходимости перейти от напряжения прикосновения к току, проходящему через тело человека, нужно правую и левую части выражения (1.9) умножить на G_h . Тогда:

$$\dot{I}_h = UG_h \frac{Y_b(1-a^2) + Y_c(1-a) + Y_0}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_0 + G_h}. \quad (1.11)$$

В соответствии с исходным условием выражение (1.11) определяет ток, проходящий через человека при прикосновении к фазе А. Формулы для расчета тока, проходящего через тело человека при прикосновении к фазам В или С, могут быть получены аналогичным путем. Из выражения (1.11) следует, что опаснее прикосновение к той фазе, проводимость которой относительно земли меньше, т. е. полное сопротивление выше, чем у других фаз. Действительно, проводимость фазы А (Y_a), к которой прикоснулся человек, присутствует только в знаменателе, и чем оно меньше, тем больше значение тока, проходящего через тело человека.

В практических расчетах в ряде случаев принимается симметричная изоляция фаз относительно земли, т. е.:

$$Y_a = Y_b = Y_c = Y. \quad (1.12)$$

С учетом выражений (1.7) и (1.12) формула (1.11) значительно упростится и примет вид:

$$\dot{I}_h = UG_h \frac{4Y + Y_0}{3Y + Y_0 + G_h}. \quad (1.13)$$

Совместное решение выражений (1.13), (1.1) и (1.12) позволяет увеличить формулу, удобную для расчетов:

$$\dot{I}_h = UG_h \frac{g_0 + 3g + j(b_0 + 3b)}{G_h + g_0 + 3g + j(b_0 + 3b)}. \quad (1.14)$$

Из выражений (1.11), (1.13) и (1.14) видно, что опасность поражения человека при однополюсном прикосновении зависит не только от рабочего напряжения электроустановки, проводимости ее изоляции и проводимости тела человека, но и от режима нейтрали источника питания. Поэтому рассмотрим более подробно особенности сетей с различным режимом нейтрали.

Сеть с изолированной нейтралью характеризуется тем, что $Y_0 = 0$. Схема замещения трехфазной сети с изолированной нейтралью при прикосновении человека к фазе А приведена на *рис. 1.2*. На этом рисунке показана сеть, у кото-

рой обмотки источника питания соединены звездой. Сети данного типа могут вообще не иметь нейтральной точки, например, если обмотки источника соединены в треугольник. Нулевой провод в таких сетях, естественно, отсутствует. Первичные обмотки источника питания (трансформатора) на схеме не показаны.

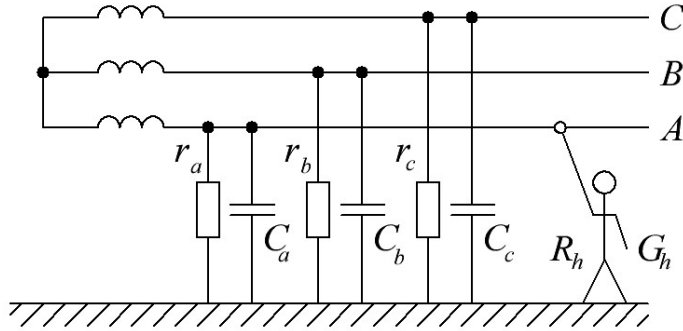


Рис. 1.2. Схема трехфазной сети с изолированной нейтралью для случая прикосновения человека к фазе А

С учетом сказанного для сети с изолированной нейтралью выражение (1.11) будет иметь вид:

$$\dot{I}_h = UG_h \frac{Y_b(1-a^2) + Y_c(1-a)}{Y_a + Y_b + Y_c + G_h}. \quad (1.15)$$

Из этого выражения видно, что сделанные ранее выводы будут справедливы и для сети с изолированной нейтралью.

Во многих случаях емкости фаз относительно земли могут быть приняты равными, т. е. $C_a = C_b = C_c = C$, тогда выражение (1.15) с учетом уравнений (1.1) и (1.7) примет удобный для расчетов вид:

$$\dot{I}_h = \frac{UG_h}{2} \frac{3(g_b + g_c) + j[6b + \sqrt{3}(g_b + g_c)]}{G_h + g_a + g_b + g_c + j3b}. \quad (1.16)$$

При полной симметрии сопротивлений изоляции фаз относительно земли, т. е. при выполнении условия (1.12):

$$\dot{I}_h = UG_h \frac{3g + j3b}{G_h + g_0 + 3g + j3b}. \quad (1.17)$$

Если параметры изоляции выразить в полных проводимостях, то выражение (1.17) будет иметь вид:

$$\dot{I}_h = \frac{3UG_h Y}{G_h + Y}. \quad (1.18)$$

Заменив в этом выражении проводимости сопротивлениями, т. е. $Z = 1/Y$ и $R_h = 1/G_h$, получим простую и удобную для расчета формулу:

$$\dot{I}_h = \frac{3U}{3R_h + Z}. \quad (1.19)$$

Это выражение наглядно показывает, что значение тока, проходящего через тело человека, тем меньше, чем меньше рабочее напряжение сети и чем больше сопротивления изоляции между фазными проводами и землей. Таким образом, изоляция токоведущих частей электроустановок и поддержание ее на соответствующем уровне является важным мероприятием по предупреждению электротравм.

В сетях напряжением до 1000 В малой протяженности емкостным сопротивлением изоляции можно пренебречь, тогда $Z = r$. В качестве примера можно показать влияние изоляции на значение тока, проходящего через тело человека при касании фазы сети 380/220 В.

При прикосновении человека к фазе в сети с хорошей изоляцией, когда $Z = r \gg R_h$,

$$I_h \approx \frac{3U}{r}. \quad (1.20)$$

Это выражение позволяет определить необходимое сопротивление изоляции фаз сети относительно земли для обеспечения безопасности при однополюсном прикосновении. В данной сети, если принять за безопасный ток пороговый неотпускающий, то:

$$r \geq \frac{3U}{I_{hД}} = \frac{3 \cdot 220}{10 \cdot 10^{-3}} = 66 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 66 \text{ кОм}. \quad (1.21)$$

Этот пример показывает, что в рассматриваемой сети безопасность может быть достигнута изоляцией.

В разветвленных сетях, где активное сопротивление изоляции соизмеримо с сопротивлением тела человека и емкость сети велика, выражение (1.19) принимает вид:

$$I_h \approx \frac{U}{R_h}, \quad (1.22)$$

т. е., человек, касаясь фазы, оказывается почти под фазным напряжением. В рассматриваемой сети через тело человека, при этом, пройдет ток, равный 220 мА, который представляет смертельную опасность.

В сетях напряжением выше 1000 В активная составляющая сопротивления изоляции, как правило, велика. Однако наличие существенной емкости сети относительно земли и высокое рабочее напряжение сети обуславливают значительную опасность для человека при прикосновении к фазе.

Если возникает необходимость учесть в расчетах нелинейность сопротивления тела человека, то нужно воспользоваться зависимостью R_h от U_h в аналитической форме.

Аппроксимируя известную зависимость сопротивления тела человека от величины приложенного напряжения и, перейдя к проводимости тела человека, получаем выражение:

$$G_h = G_{h0}(1 + \gamma U_h), \quad (1.23)$$

где G_{h0} — проводимость тела человека, равная $4 \cdot 10^{-4}$ при $U_h = 0$, см;
 γ — коэффициент пропорциональности равный 1 : 70, В⁻¹.

Используя выражение (1.23) можно определить проводимость тела человека в зависимости от приложенного напряжения. Это выражение также позволяет найти для каждого значения I_h соответствующее ему U_h .

Совместное решение выражения (1.23) и полученных нами формул для расчета тока в цепи человека и напряжения прикосновения позволяет определить названные величины с учетом нелинейности сопротивления тела человека. Так, совместное решение выражений (1.10), (1.12) и (1.23) для сети с изолированной нейтралью позволяет получить уравнение:

$$\dot{U}_h = \frac{3Y}{3Y + G_{h0}(1 + \gamma U_h)}. \quad (1.24)$$

С учетом формулы (1.1) выражение (1.24) примет удобный для расчета вид:

$$\dot{U}_h = \frac{U}{\sqrt{1 + \frac{G_{h0}(1 + \gamma U_h)[6g + G_{h0}(1 + \gamma U_h)]}{(3g)^2 + (3\omega C)^2}}}. \quad (1.25)$$

Это выражение позволяет также, в частности, определить необходимые параметры изоляции сети относительно земли в зависимости от напряжения сети для заданных значений напряжения прикосновения.

Сеть с глухозаземленной нейтралью характеризуется тем, что нейтральная точка источника питания соединена с землей через малое сопротивление R_0 .

Следовательно, в расчетах можно принять:

$$Y_0 = \frac{1}{R_0} \gg Y_a, Y_b, Y_c, G_h. \quad (1.26)$$

С учетом неравенства (1.26) выражения (1.10) и (1.11) значительно упрощаются и принимают соответственно вид:

$$U_h = U; \quad (1.27)$$

$$I_h = UG_h = \frac{U}{R_h}. \quad (1.28)$$

Таким образом, напряжение прикосновения в сетях с глухозаземленной нейтралью практически не зависит от состояния изоляции и равно фазному напряжению источника питания.

1.2.2. Анализ условий поражения человека при работе на электроустановках постоянного тока

Для электроустановок постоянного тока характерными условиями поражения человека электрическим током являются, как и для электроустановок переменного тока, двухполюсное прикосновение, однополюсное (прямое и косвенное) и включение под напряжение шага. Определим значение тока в цепи тела человека при различных условиях поражения. В данном случае необходимо иметь в виду, что постоянный ток, как уже отмечалось выше, в некотором диапазоне U_h представляет для человека меньшую опасность по сравнению с током промышленной частоты.

При двухполюсном прикосновении человек подключается под полное рабочее напряжение электроустановки. Опасность в данном случае определяется величиной этого напряжения и сопротивлением человека. При высоких напряжениях электроустановки такое включение представляет для человека значительную опасность. Во всяком случае, возможны ожоги.

Напряжение шага, как и в электроустановках переменного тока, зависит от тока замыкания на землю, параметров грунта и места нахождения человека в поле растекания тока.

Наибольший интерес представляет однополюсное прикосновение человека, имеющего токопроводящую связь с землей, к токоведущим элементам электроустановки. Причем, это условие поражения представляет для человека различную опасность в однопроводных, двухпроводных и трехпроводных сетях постоянного тока.

На *рис. 1.3* приведена схема замещения двухпроводной сети постоянного тока для случая прикосновения человека к проводу 1. Источником питания сети является генератор Γ . Сопротивление изоляции сети на *рис. 1.3* обозначено сосредоточенными параметрами r_1, r_2, C_1 и C_2 .

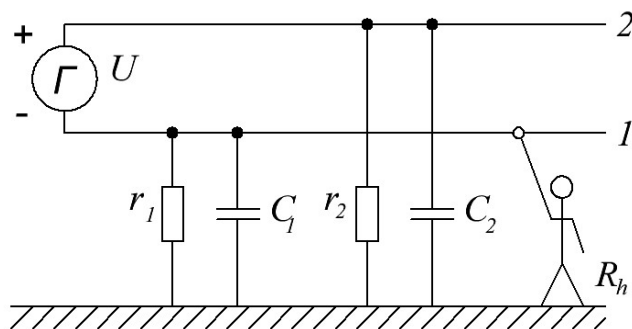


Рис. 1.3. Схема замещения двухпроводной сети постоянного тока для случая прикосновения человека к проводу

Значение тока, проходящего через тело человека, в каждый момент времени определяется выражением:

$$i_h(t) = \frac{U n}{R_h(n + r_2) + n r_2} \left[1 + \frac{n r_2}{R_h(n + r_2)} e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1.29)$$

где R_h — сопротивление тела человека постоянному току;

τ — постоянная времени рассматриваемой сети равная $\frac{R_h n r_2 (C_1 + C_2)}{R_h(n + r_2) + n r_2}$.

Из выражения (1.29) видно, что при прикосновении человека к проводу сети постоянного тока ток, протекающий через его тело в течение некоторого времени, изменяется по показательному закону, затем устанавливается постоянное значение тока. Таким образом, *постоянная времени τ* равна промежутку времени, в течение которого ток переходного процесса в цепи тела человека уменьшается в 2,7 раза.

В момент прикосновения человека к проводу ($\tau = 0$):

$$i_h(0) = \frac{U n}{R_h(n + r_2)}; \quad (1.30)$$

в установившемся значении ($\tau = \infty$):

$$i_h(\infty) = \frac{U n}{R_h(n + r_2) + n r_2}. \quad (1.31)$$

Из выражений (1.30) и (1.31) видно, что значение тока в переходный период может значительно превышать установившийся ток. Однако большой опасности переходные токи не представляют, так как в реальных сетях они продолжаются лишь сотые доли секунды, поэтому в дальнейшем при анализе условий поражения будем учитывать только установившиеся значения токов в цепи тела человека.

В рассматриваемой сети при снижении сопротивления изоляции провода l ($r_1 \rightarrow 0$) значение тока в цепи тела человека уменьшается. При уменьшении r_2 ток будет возрастать, а при замыкании на землю провода 2 человек окажется под напряжением, близким напряжению источника питания сети. Таким образом, замыкание на землю провода, которого коснулся человек, уменьшает значение тока в цепи тела человека, а замыкание на землю второго провода повышает опасность поражения человека током.

На *рис. 1.4* приведена схема замещения однопроводной сети постоянного тока. В качестве второго проводника в этой сети служит земля. Генератор Γ имеет связь с землей через заземлитель сопротивлением R_0 . Человек, сопротивление тела которого равно R_h , касается проводника. Значение тока, проходящего через него, будет определяться выражением:

$$I_h = \frac{U_r}{R_h(r + R_0) + r R_0}. \quad (1.32)$$

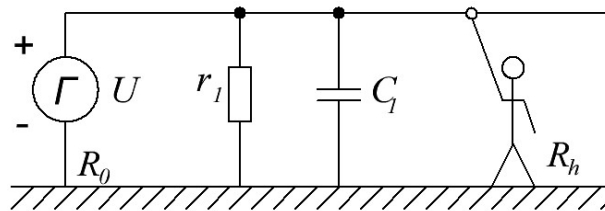


Рис. 1.4. Схема замещения однопроводной сети постоянного тока для случая прикосновения человека к проводу

В электрических сетях $R_0 \ll r$ поэтому $I_h = \frac{U}{R_h}$. Следовательно, в данной сети состояние изоляции проводов относительно земли не оказывает существенного влияния на ее безопасность. Основное значение в этом вопросе имеет напряжение источника питания.

В случае трехпроводной сети постоянного тока (*рис. 1.5*) значение тока, проходящего через тело человека, будет определяться следующими выражениями:

- при прикосновении к проводу 1:

$$I_h = \frac{U_1(g_2 + g_0) + U_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_0 + G_h} G_h; \quad (1.33)$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru