

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОУЗЛА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ С ПРИВЯЗКОЙ К ВИДАМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

На крупном промышленном предприятии, которое содержит несколько видов технологических линий для обеспечения непрерывного производственного процесса в электросетевом комплексе металлургического предприятия (МП), для осуществления нормального режима работы энергосистемы необходимо обеспечить качество электроснабжения, которое определяется надежностью и экономичностью. Для оценки надежности и состояния электрооборудования электросетевого комплекса требуется выполнить анализ нарушений режимов работы системы электроснабжения МП напряжением 10–220 кВ за 2007–2020 г. Анализ статических данных отключений показал, что основными причинами перерыва электроснабжения являются короткие замыкания, наложение нескольких факторов и невыясненные обстоятельства, а также 70% всех отказов приходится на кабельные линии, 25 % — на воздушные линии и 5% — отказы силовых трансформаторов. В настоящее время связь электрооборудования и питаемых технологических объектов зависит от их износа. На примере основных технологических процессов производства черной металлургии детально рассматриваются агломерационное и прокатное производство, как наиболее энергоемкие и ответственные потребители. Необходимо выявить категории наиболее изношенного электрооборудования для разработки комплекса мероприятий для повышения надежности и сокращения ущерба.

**Ключевые слова:** надежность электрооборудования, металлургическое предприятие, ущерб, статистика аварийных отключений, параметр потока отказов, прогнозирование отказов.

**Введение.** Обеспечение непрерывного производственного процесса крупного металлургического предприятия является одной из важнейших задач электросетевого комплекса, который достигается за счет осуществления нормального режима работы системы электроснабжения энергоузла [1–3]. Технологический процесс промышленного предприятия в своей основе зависит от качества электроснабжения, которое определяется надежностью и экономичностью.

Надежность электроснабжения характеризуется непрерывностью обеспечения потребителей электроэнергией заданного качества в соответствии с графиком электропотребления. Даже кратковременная остановка электроснабжения может

привести к остановке сложного технологического процесса и к значительному экономическому ущербу. Надежность системы электроснабжения [4–7] в полной мере зависит от физического и морального состояния оборудования и устройств релейной защиты и автоматики [8], состояние повышенного износа которых может привести к увеличению частоты возникновения отказов и длительности их устранения.

Несоблюдение установленных и нормируемых показателей качества электроэнергии [9] приводит к нарушению электромагнитного и технологического характера: увеличение потерь активной и реактивной мощности; сокращение срока службы электрооборудования; увеличение капитальных

вложений; нарушение условий нормального функционирования электроприемников; нанесение вреда окружающей среде и здоровью человека.

**Обзор.** Надёжность электрооборудования, а также электрических сетей зависит от технического состояния. Техническое состояние электрооборудования и сетей зависит от времени эксплуатации, условий среды, режимов работы и их обслуживания. Сейчас наблюдается тенденция старения электрооборудования и сетей, можно выявить множество случаев работы на предельно допустимых значениях или превышающих истёкший срок эксплуатации, что приводит к увеличению количества отказов. Количество отказов зависит не только от вышеперечисленных факторов, но и от индивидуального обслуживания и оснащённости системами диагностики объектов, с уставленной документацией и периодичностью, и средств контроля и диагностики состояния электрооборудования. Одним из перспективных направлений считается их интеллектуализация, цифровизация для повышения качества, распознавания и прогнозирования технологического ресурса и состояния объекта. Стоит отметить, что требуется совершенствование методов предвидения технологического состояния объектов, чтобы иметь возможность заранее принять меры по предотвращению ущерба.

Отметим основные методы и способы прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса для безопасной эксплуатации:

— точные методы основываются на определении закономерностей развития дефектов, статистической обработке данных, вероятностной оценке значений показателей;

— фактологические методы основываются на данных об объекте прогнозирования и его прошлом развитии;

— нечеткий алгоритм оценки основан на испытаниях и измерении электрооборудования и оценке существующих баз данных, вследствие чего определяется тип этого объекта и, в соответствии с типом, происходит прогнозирование дальнейших действий [10];

— интеллектуальный метод основан на нечёткой логике и использовании технологии экспертных систем, которые обеспечивают повышение качества распознавания технологического состояния объекта [10].

Необходимо отметить, что отдельное внимание уделяется вопросам диагностирования различных видов и типов электрооборудования, распределительных устройств, а также определению остаточного ресурса электродвигателей, применению теплового способа контроля остаточного ресурса электрооборудования.

Глазов И. О. в своей статье [11] привел основные классификации отказов электрооборудования: механические, технологические и обусловленные ошибками при эксплуатации. В работе были описаны условия для прогнозирования остаточного ресурса: наличие параметров, с помощью которых возможно определить состояние оборудования, должны знать степень предельного состояния, способность осуществления постоянного или периодического контроля за техническим состоянием оборудования.

Коллективом авторов работы [12] был предложен метод построения математической модели для оценки изменения выработанного ресурса на основе данных диагностики с использованием

замеров отклонений основных эксплуатационных факторов.

В работе [13] детально рассмотрению в условиях агропромышленного комплекса подвергается определение и прогнозирование длительности безаварийной работы электрооборудования путем измерения сопротивления изоляции, токов утечки, степени окисления контактов, величины зазора и т.д., что является альтернативным способом.

Необходимо выделить изучение состояния изоляции кабелей. Метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса изоляции кабельных линий был предложен авторами статьи [14]. В ней расчет изменения теплового потока, который проходит через слои изоляции кабеля, проводится в зависимости от радиальных расстояний при помощи кусочно-заданных функций и учёта теплового сопротивления включения. Из данных строится математическая модель, которая позволяет вместе с послойным расчетом изотерм поперечного сечения кабеля определить наличие включений в изоляционном материале (ИМ). Модель учитывает тепловые потери, опираясь на геометрические и тепловые величины включения. Предложен способ для определения срока службы ИМ, который учитывает суммарную напряжённость электрического поля при различных размерах включений и их геометрических и электрических параметрах. При этом способ определения энергии активации структурного пробоя и модель старения изоляционного материала позволит использовать её для определения остаточного ресурса и прогнозирования износа ИМ.

Обратимся к статье [15], в которой описывается нечеткое прогнозирование изоляции электрооборудования. Состояние изоляции является одним из факторов в безотказном функционировании электрооборудования. Нечеткое прогнозирование позволяет учитывать разнородную входную информацию, а также её неопределённость и неполноту. При таком подходе, в сравнении с обработкой только количественных данных, получаются более достоверные результаты прогнозирования. Практически идентичный метод определения технического состояния электрооборудования при помощи нечёткой логики также используют в статье [16]. Общеизвестным методом [17] для прогнозирования срока службы является метод контроля тангенса диэлектрических потерь с помощью высокоточных приборов, для определения надёжности кабельных линий. Характер изменения тангенса диэлектрических потерь объясняется протеканием реакций окислительного дегидрохлорирования полихлоропрена в процессе термического старения изоляции кабеля и изменения его массы. Поэтому данный параметр может являться одним из весомых вариантов для диагностической оценки состояния изоляции кабеля и прогнозирования срока его службы.

Авторы статьи [18] предлагают рассмотреть способ прогнозирования на основании обработки эксплуатационной информации по интенсивности отказов, полученной по статистическим данным. Исходя из этого, можно прогнозировать время выхода из строя оборудования и принимать меры по ремонту или дополнительному осмотру оборудования.

Новый подход [19], в котором описывается применение нейронных сетей, основанное на термодинамических процессах, что позволяет оценивать текущее состояние изоляции и прогнозировать

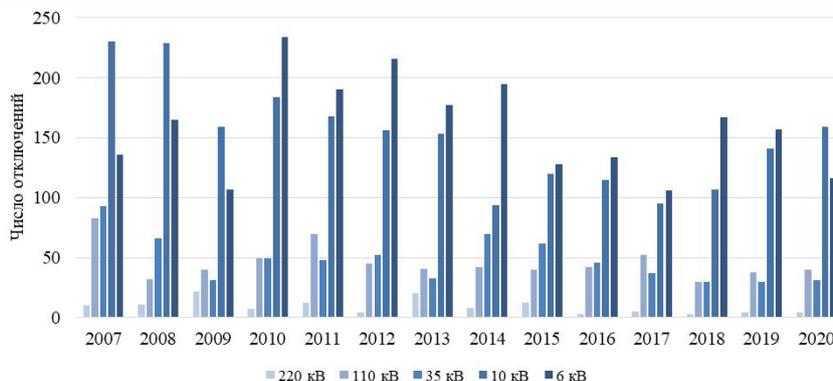


Рис. 1. Анализ количества отказов сетей 10 – 220 кВ

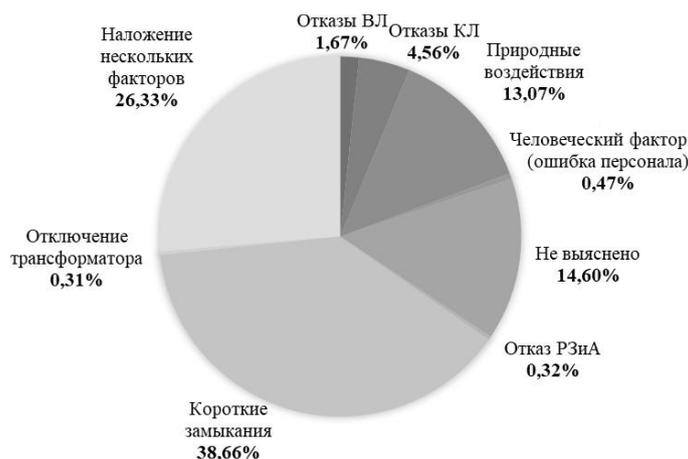


Рис. 2. Процентное соотношение отказов по видам отключений

остаточный ресурс кабелей. Данный способ предлагается применять для планирования режимов работы энергосистемы с целью повышения надёжности. Авторским коллективом из Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева была рассмотрена проблема прогнозирования состояния электрооборудования [20], для решения которой предлагается повысить степень автоматизации контрольных операций, применение интеллектуализации процессов обработки информации и технологии экспертных систем. Применяя известные закономерности изменения состояния системы, при помощи интерполяционного полинома Лагранжа, можно прогнозировать поведение системы, а обработка полученных результатов дает возможность управления техническим состоянием электрооборудования.

Один из инновационных методов рассмотрен в статье [21], он подразумевает прогнозирование и оценку технического состояния электрооборудования для решения задачи классификации посредством машинного обучения. В процессе работы формируются индекс состояния от 0 до 100 баллов, которым обозначается состояние оборудования, где 0 — критическое, 100 — очень хорошее. Основное преимущество разработанной методики заключается в точности, обусловленной реальным состоянием оборудования, без применения статистического подхода.

Проведя анализ работ авторов, можно выявить множество достаточно продуктивных методов определения остаточного ресурса оборудования и прогнозирования его будущей работы. В статье будет

рассмотрен метод статистической обработки результатов, полученных на промышленном предприятии отказов. Заметим, что такой метод применим в том случае, если наблюдается разнородность оборудования и её специализация по режимам работы.

**Постановка задачи.** Целью данного исследования является выполнение оценки состояния электросетевого комплекса предприятия черной металлургии и расчета экономического ущерба в случае возникновения простоя, с привязкой к виду технологического производства для разработки комплекса мер по сокращению простоев и повышению надежности в работе элементов системы электроснабжения.

**Материалы и методы. Анализ состояния энергосистемы, питающей крупное промышленное предприятие черной и цветной металлургии.** Энергоузел характеризуется большим сосредоточением крупных нагрузок на сравнительно малых площадях с преобладанием непротяженных линий электропередач напряжением 110 и 220 кВ, а также наличием, как сложноразветвленных, так и разомкнутых участков, с преобладанием последних. Потребляемая мощность составляет около 1300 МВт, при этом генерируемая мощность равна 657 МВт. Общая протяженность ЛЭП (линии электропередач) составляет 1548,2 км, в том числе ЛЭП 110 кВ — 327,066 км; ЛЭП 35 кВ — 193,7 км; ЛЭП 10 кВ — 1027, 443 км. МП является одним из мощных промышленных комплексов по производству черной металлургии и крупнейшим потребителем электроэнергии с преобладанием электроприемников I и II категории, а также особой группы.

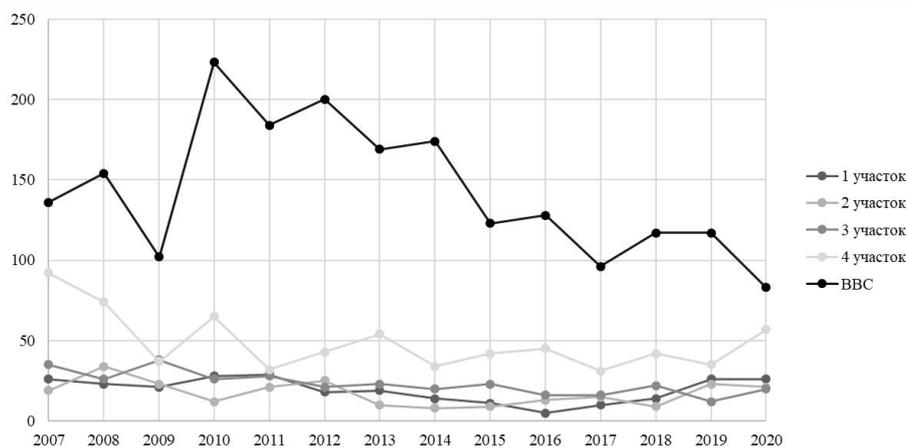


Рис. 3. Статистика аварийных отключений по участкам с привязкой по виду производства за период 2007–2020 гг.

Согласно обработке статистических данных, был выполнен анализ нарушений режима работы системы электроснабжения МП напряжением 6–220 кВ за 2007–2020 гг., который представлен на рис. 1. Из данного анализа видно, что основная часть отключений приходится на сети напряжением 10 кВ. Меньше всего отключений случается в сети напряжением 220 кВ. По общим данным можно сделать вывод о том, что количество отключений снижается для всех классов напряжений, однако стоит отметить, что за последние три года количество отключений для сетей 110 кВ увеличилось на 48 % начиная с 2017 года. Также наблюдается рост нарушений электроснабжения в сетях 10 кВ. Для более детального анализа в рамках работы рассмотрены основные причины аварийных отключений. Согласно анализу данных, были выделены основные причины аварийных отключений и сведены в диаграмму (рис. 2).

Анализ статических данных отключений показал, что основными причинами перерыва электроснабжения являются короткие замыкания, наложение нескольких факторов и невыясненные обстоятельства. Высокий процент показателя причины наложения нескольких факторов свидетельствует о том, что система электроснабжения не усовершенствована, так как одно отключение влечет за собой ряд нескольких других отказов. Также большой процент аварийных отключений происходит из-за природных воздействий, которые характеризуются изменением погодных и климатических условий: усиление ветров, дожди, грозы. Более подробно были проанализированы отказы ВЛЭП (воздушные линии электропередач), КЛЭП (кабельные линии электропередач) и силовых трансформаторов. При оценке отказа ВЛЭП было учтено повреждение линии, изоляторов и обрыв грозозащитного троса. Отказ кабеля обусловлен повреждением в линии, в соединительной и концевой муфтах. Отказ трансформатора характеризуется внутренним или внешним повреждением. По результатам за период 2007–2020 гг. сделан вывод, что 70 % всех отказов приходится на кабельные линии, 25 % — на воздушные линии и 5% — отказы силовых трансформаторов. Существенное количество отказов кабельных линий обусловлено высыханием изоляционного заполнителя и общим старением изоляции в кабеле. Также анализ показал, что с ростом срока эксплуатации происходит увеличение числа повреждений.

### Оценка надежности объектов системы электроснабжения по участкам с привязкой по виду технологического процесса.

Основной задачей МП является производство и обеспечение потребителей высококачественной продукцией. Объем производства стали за 2019 год составил 12,5 млн т, за 2020 год — 11,6 млн т. Основными технологическими процессами производства черной металлургии и стали являются агломерационное, коксохимическое, доменное, сталеплавильное, прокатное, листопрокатное производство, кислородно-конвертерный и электросталеплавильный цеха. В зависимости от технологического процесса и загрузки главных понизительных ТП, состоящих на балансе цеха сетей, подразделены на участки. Анализ надежности по участкам позволяет выделить наиболее проблематичный участок, определить основные причины аварийных отключений и своевременно осуществить замену оборудования и ремонтные работы.

По результатам статистических данных отключения была проведена оценка надежности элементов сети с привязкой участков к видам производства (рис. 3), которая выявила наиболее подверженный отключениям участок высоковольтных сетей (ВЭС), включающий в себя подстанции, питающие известняково-доломитовый карьер, горнопромышленное предприятие «Рудник», ДООЦ (дробильно-обжиговый цех), рудник Малый Куйбас. Согласно оценке аварийных отключений объектов сети 10–110 кВ, принадлежавших участку ВЭС, наиболее подвержены нарушению электроснабжения потребителей, служащих для приемов ведения процессов дробления, сортировки и отгрузки известняка и доломита в ДООЦ горно-обогажительного производства (ГОП), а именно электродвигателей дробилок, вентиляторов, дымососов на напряжении 10 кВ. Анализ статистических данных по отказам, обусловленным природными воздействиями, представлен на рис. 4.

За период 2007–2020 гг. было зафиксировано 340 нарушений по причине воздействия природных условий на участке ВЭС. Основными причинами нарушений электроснабжения являются ветровые нагрузки (46,18 %), которые влекут за собой не только вибрацию и «пляску» проводов, но и приводят к большому проценту захлёста проводов (15 %), что влечет за собой кратковременное отключение питания потребителей. Стоит отметить, что климатические условия со времен проектирования электрической сети сильно отличаются от климатических

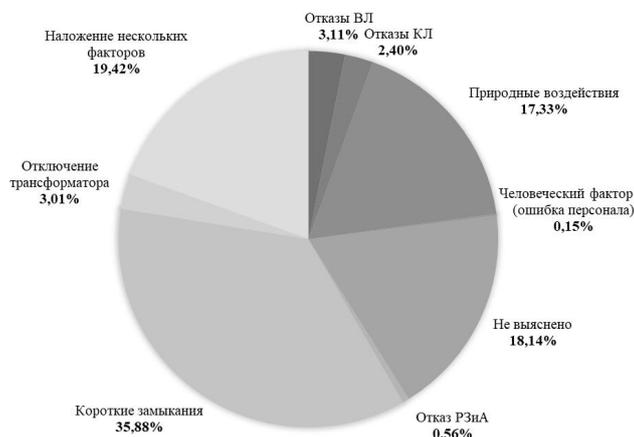


Рис. 4. Процентное соотношение отказов по видам отключений для участка ВВС

условий в настоящее время, поэтому электрооборудование устарело не только физически, но и подвергается более агрессивному разрушению и повреждению. Также основной причиной повреждения линий электропередач являются грозовые отключения, составляющие более 35 %, которые в основном приходятся на конец весеннего периода и начало летнего. Нарушение технологического процесса может быть обусловлено человеческим фактором. Стабильно остается высоким показатель количества отключений, связанных с валкой деревьев на провода воздушной линии при организации и выполнении целевых программ по расширению просек ВЛЭП.

При анализе количества аварийных отказов отдельных элементов сети было выявлено, что на участке ВВС большему повреждению подвержены воздушные линии, что составляет 55 % от общего числа всех повреждений, наименьшее число отказов приходится на трансформаторы (4 %). Основными причинами отказов кабельных линий является повреждение кабеля на участке и повреждение в концевой муфте.

Несмотря на то, что количество аварийных отключений по причине человеческого фактора составляет наименьшую долю, аварии могут иметь наибольшую тяжесть, например, создание трехфазного короткого замыкания при неправильных оперативных переключениях.

В результате анализа отключений было выявлено, что основная доля отключений происходит в сетях напряжением 10 кВ. Также за последние три года наблюдается рост количества отключений в сетях 110 кВ. Наиболее подвержены нарушению технологического процесса рудник Малый Куйбас и дробильно-обжиговой цех горно-обогатительного производства.

Основная масса отключений приходится на кабельные линии. Отказ кабельной линии обуславливается повреждением кабеля в результате потери изоляционных свойств из-за несоблюдения эксплуатационных показателей (возникновения перенапряжений, перегрузок, электрических разрядов), общего старения изоляции и воздействия агрессивной среды.

С целью повышения надежности электроснабжения необходимо: заменить масляные выключатели ОРУ (открытое распределительное устройство) на элегазовые; магистрали кабельных линий с бумажной изоляцией — на сшитый полиэтилен; оборудование кабельных туннелей — на системы

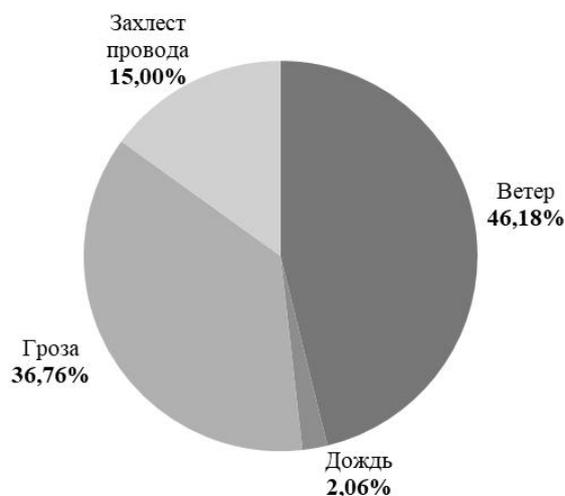


Рис. 5. Воздействие природных условий за период 2007–2020 гг.

охранно-пожарной сигнализации и автоматические системы пожаротушения; ячейки КРУ (комплектное распределительное устройство) с масляными выключателями на вакуумные.

Анализ причин нарушения электроснабжения на рис. 5 показал, что наиболее распространенной причиной являются природные воздействия, а именно грозовые разряды и ветровые нагрузки. Для повышения надежности следует: установить гасители вибрации на участках ВЛЭП; заменить стеклянные подвесные изоляторы на полимерные; проводить перед грозным сезоном ревизию молниезащит; выполнять исследования ВЛЭП после грозных разрядов.

В результате обеспечения данных мероприятий ожидается снижение повреждаемости кабельных и воздушных линий, а также силовых трансформаторов.

**Результаты. Оценка ущерба потребителя при нарушении электроснабжения на примере агломерационного и прокатного производств.** Остановимся более подробно на двух видах производств предприятий черной металлургии).

**Агломерационное производство.** Основной продукт — агломерат, представляющий собой прочный пористый спек железорудных концентратов, агломерат и отходов производства с добавлением флюсов.

Процесс агломерации позволяет создать продукт для доменного цеха и обеспечивает частичное удаление вредных примесей (таких как сера и фосфор), также данный процесс позволяет утилизировать и вновь вовлекать в производство различные отсевы железорудного сырья и кокса, пыль газоочисток и шламы, тем самым обеспечивая снижение себестоимости конечной продукции и загрязнения окружающей среды.

Нарушение технологического процесса в результате внезапного перерыва электроснабжения может привести к значительному экономическому ущербу, который складывается из недоотпуска продукции, простоя рабочих и оборудования, брака продукции, дополнительных расходов на сырье, поврежденное оборудование и угрозы окружающей среде.

В зависимости от типа потребителя, величины недополученной энергии и наличия у потребителя технологических и иных резервов выделяют четыре характерных случая: незначительный ущерб, высокая тяжесть ущерба, средняя и максимальная. Максимальная тяжесть ущерба характеризуется прекращением работы, угрозой жизни людей или глубоким ущербом окружающей среде, который невозможно оценить в денежном эквиваленте.

По причинам возникновения выделяют внезапные ущербы и ущербы в результате плановых остановок, которые связаны с выводом в ремонт энергетического оборудования. Внезапное, непреднамеренное отключение потребителей возникает при отказах, характеризующихся мгновенным снижением мощности до нуля, в результате чего происходит остановка технологических агрегатов, их повреждение и массовый брак продукции. Повторное включение не всегда возможно осуществить в связи с возможной поломкой оборудования, для ввода в эксплуатацию которого необходимо проведение восстановительных работ. Таким образом, потребителю наносится ущерб, складывающийся из стоимости оборудования, его наладки и восстановления нормального режима работы.

В процессе работы был разработан алгоритм (рис. 6) в виде блок-схемы для наглядности и удобства восприятия, также в ней показана оценка степени ущерба для предприятия, которая основывается на прибыли за период простоя объекта и является отношением убытков к прибыли.

Таким образом, расчетный экономический ущерб потребителя от перерыва электроснабжения имеет две составляющих:

$$Y = Y' + Y'', \quad (1)$$

где  $Y'$  — первичный ущерб, вызванный перерывом электроснабжения данного потребителя (предприятия или технологического агрегата), руб.;

$Y''$  — вторичный ущерб в результате вынужденного простоя следующей технологической ступени или смежного предприятия, руб.

В приближенных расчетах и при проектировании удобно пользоваться относительной величиной удельного ущерба на единицу потребляемой электроэнергии или на единицу продукции, которая является примерно постоянной для родственных предприятий каждой отрасли:

$$Y_i = [(y_0 + y_i \cdot T_{в.расч}) \cdot \omega_{расч}] \cdot P' \cdot \gamma \quad (2)$$

где  $y_0$  — удельный ущерб внезапности, руб./кВт·ч;

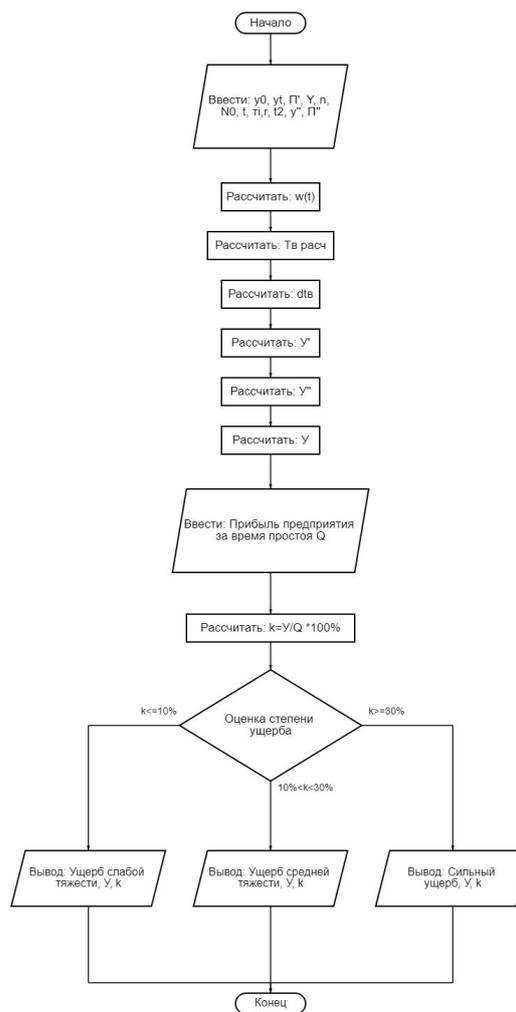


Рис. 6. Блок-схема для расчёта ущерба с учетом степени ущерба

$Y_i$  — удельный ущерб производительности, руб./кВт·ч;

$T_{в.расч}$  — расчетное время восстановления, ч;

$\omega_{расч}$  — величина параметра потока отказа в режиме длительных отключений, 1/год;

$P'$  — средняя годовая производительность первичного предприятия, ед.прод./час.;

$\Gamma$  — степень ограничения производства при перерывах электроснабжения.

Вторичный ущерб, вызванный в результате вынужденного простоя следующей технологической ступени или смежного предприятия, определяется по выражению:

$$Y'' = y_i'' \cdot \Delta t_{в} \cdot \omega_{рез} \cdot P'' \cdot \gamma \quad (3)$$

где  $\Delta t_{в}$  — простой вторичного потребителя, учитывая его резервы, ч;

$P''$  — средняя годовая производительность вторичного предприятия, ед.прод./час.

$$\Delta t_{в} = T_{в.расч} - \frac{t_2}{\gamma} \quad (4)$$

где  $t_2$  — дополнительное время перерыва питания для первичного производства без ущерба вторичного, ч.

Параметр потока отказа является основной чис-

ловой характеристикой и характеризуется плотностью вероятности возникновения отказа восстанавливаемой системы (элемента), определяемого для заданного момента времени.

Для его определения достаточно знать отношение числа отказавших элементов в единицу времени к общему числу испытываемых объектов при условии, что все вышедшие из строя элементы восстанавливаются:

$$\omega(t) = \frac{n(t)}{N_0 \cdot t} \quad (5)$$

Среднее время восстановления определяется средним временем отыскания и устранения одного отказа.

$$T_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^r \tau_i}{r} \quad (6)$$

где  $r$  — число отказов системы за определенный период;

$\tau_i$  — время восстановления после  $i$ -го отказа.

Оценка ущерба проводится по формуле (7), так же далее результат обрабатывается и выявляется категория ущерба: сильный ( $k \geq 30$  %), средний ( $10 \% < k < 30$  %) или слабый ( $k \leq 10$  %).

$$k = \frac{Y}{Q} 100 \% \quad (7)$$

МП является одним из крупнейших производителей стали и черной металлургии России. На его территории находится 3 аглофабрики, включающие 13 агломашин общей площадью спекания 940 м<sup>2</sup> и годовой производственной мощностью 11,2 млн т агломерата. Вторичным производством для агломерационного производства является доменное. В технологическом процессе задействовано 8 доменных печей с суммарным полезным объемом 12180 м<sup>3</sup> и годовой производственной мощностью 10,12 млн т чугуна.

По результатам статистики аварийных отключений за 2019 год была нарушена работа четырех агломашин, общее число отказов составило 11, общее время с момента нахождения отказа и его устранения составило менее 4 часов.

Для данного вида производства  $\omega_{\text{рез}} = 0,0012$  1/год,  $T_{\text{в, рас}} = 4$  час. Зная все необходимые параметры, найдем по формуле (2) первичный ущерб для агломерационного производства.

$$Y' = [(0,72 + 0,46 \cdot 4) \cdot 0,0012] \times \\ \times 0,86 \cdot 10^6 \cdot 2 = 5283,84 \text{ тыс. руб.}$$

Дополнительное время перерыва питания для агломерационного производства без ущерба доменного производства составляет 10 мин. Вторичный ущерб составит (3):

$$Y'' = 0,46 \cdot \left(4 - \frac{0,167}{2}\right) \times$$

$$\times 0,0012 \cdot 0,86 \cdot 10^6 \cdot 2 = 3718,48 \text{ тыс. руб.}$$

Суммарный ущерб от перерыва электроснабжения определится по формуле (1):

$$Y = Y' + Y'' = \\ = 5283,84 + 3718,48 = 9002,32 \text{ тыс. руб.}$$

В результате проведения мероприятий по повышению надежности, таких как замена масляных выключателей ОРУ на элегазовые и КРУ на вакуумные, кабелей магистральных линий с бумажной изоляцией на шитый полиэтилен, стеклянных изоляторов на полимерные, замена трансформаторов и т.д. при этом целевое значение снижения аварийных отключений составит 10 %. Примем, что время простоя агломашин не превышает 3,5 ч.

Выполним расчет суммарного экономического ущерба от перерыва электроснабжения агломерационного производства при условии снижении количества и времени отказов на 10 % (1–3):

$$Y' = [(0,72 + 0,46 \cdot 3,5) \cdot 0,0011] \times \\ \times 0,86 \cdot 10^6 \cdot 2 = 4408,36 \text{ тыс. руб.}$$

$$Y'' = 0,46 \cdot \left(3,5 - \frac{0,167}{2}\right) \times \\ \times 0,0011 \cdot 0,86 \cdot 10^6 \cdot 2 = 3457,5 \text{ тыс. руб.}$$

$$Y = Y' + Y'' = \\ = 4408,36 + 3457,5 = 7865,86 \text{ тыс. руб.}$$

В результате проведения мероприятий по повышению надежности суммарный ущерб от перерыва электроснабжения снизится на 15 %.

**Прокатное производство.** Вторым примером для рассмотрения было выбрано прокатное производство, которое является завершающим этапом в производстве продукции. Комплекс современных прокатных станов различных характеристик позволяет МП иметь самую широкую продуктовую линейку среди всех российских металлургических компаний. Производство осуществляется за счет обработки металла давлением, что необходимо не только для получения нужной формы изделия, но и для формирования у него определенной структуры и комплекса свойств [21].

Существует два типа прокатки металла: горячая и холодная. Горячая прокатка происходит при температурах 60 % и более от температуры плавления металла. В состав производства листового горячекатаного проката входит ЛПЦ-1, ЛПЦ-4, ЛПЦ-9, ЛПЦ-10, на территории которых расположены двухклетевой стан 2350, стан 2500 (непрерывный широкополосный), стан 500 (толстолистовой) и стан 2000 (непрерывный широкополосный). Общая производительность стана составляет около 11,7 млн т горячего проката.

Процесс холодной прокатки связан с холодной обработкой, когда деформация металла осуществляется при температурах около 30 % и ниже его температуры плавления. В состав производства холоднокатаного листового проката входят ЛПЦ-3, ЛПЦ-5, ЛПЦ-8, ЛПЦ-11. Листопрокатный цех № 11 (ЛПЦ-11) является самым новым и современным цехом МП. Основное технологическое оборудование цеха: непрерывная травильная линия турбулентного травления в соляной кислоте, совмещенная с 5-клетевым станом холодной прокатки производительностью 2100 тыс т в год, агрегат непрерывного горячего цинкования производительностью 450 тыс т в год, комбинированный агрегат непре-

Расчет экономического ущерба от перерыва электроснабжения для прокатного производства

Вид производства		П, млн т	$\omega_{\text{рез.}}'$ 1/год	$T_{\text{в.расч.}}'$ ч	У, тыс руб.
Производство листового горячекатаного проката	ЛПЦ-1 ЛПЦ-4 ЛПЦ-9 ЛПЦ-10	11,7	0,0011	11,5	11899,8
Производство холоднокатаного листового производства	ЛПЦ-3 ЛПЦ-5 ЛПЦ-8 ЛПЦ-11	11,3	0,0021	81	138778,92
ИТОГО:					150678,72

Таблица 2

Расчет экономического ущерба от перерыва электроснабжения для прокатного производства в результате снижения количества аварий

Вид производства		П, млн т	$\omega_{\text{рез.}}'$ 1/год	$T_{\text{в.расч.}}'$ ч	У, тыс руб.
Производство листового горячекатаного проката	ЛПЦ-1 ЛПЦ-4 ЛПЦ-9 ЛПЦ-10	11,7	0,0010	10,25	9783
Производство холоднокатаного листового производства	ЛПЦ-3 ЛПЦ-5 ЛПЦ-8 ЛПЦ-11	11,3	0,0019	72,5	112635,42
ИТОГО:					122418,42

рывного отжига/горячего цинкования производительностью 650 тыс т в год, агрегат непрерывного горячего цинкования № 3 (АНГЦ № 3).

По результатам статистики аварийных отключений за 2019 год был выполнен анализ нарушений электроснабжения основных агрегатов листопрокатных цехов.

В табл. 1 приведены основные параметры для расчета экономического ущерба и его величина, полученная по формуле (2), в результате перерыва питания основных агрегатов.

Сведем в табл. 2 расчет экономического ущерба от перерыва электроснабжения листового производства, выполненного по формуле (2), при условии снижении количества и времени отказов на 10 %.

В результате проведения мероприятий по повышению надежности электроснабжения промышленных потребителей экономический ущерб для производства листового горячекатаного проката снизился на 18 %, для производства холодного листового производства — 20 %. Суммарный экономический ущерб от перерыва электроснабжения для листового производства снизился в 1,2 раза.

**Заключение.** При анализе статистики аварийных отключений за период 2007–2020 гг. было выявлено, что основная часть отключений приходится на сети напряжением 10 кВ. С 2017 года наблюдается рост количества нарушений электроснабжения потребителей в сетях 10 и 110 кВ. Было установлено, что 70 % всех отказов приходится на кабельные линии. Основными причинами повреждения кабеля являются нарушения изоляционного заполнителя в кабеле, обусловленные несоблюдением эксплуатационных показателей (возникновения перенапряжений, перегрузок, элект-

рических разрядов), общим старением изоляции, воздействием агрессивной средой. Выполненный анализ позволил выделить слабые участки и места, подверженные наибольшему старению для разработки мер по сокращению простоев и повышению надежности. Ожидаемый экономический эффект при выполнении запланированных мероприятий составит более 15 %.

Полученные рекомендации позволят повысить функционирование системы электроснабжения промышленного предприятия с целью повышения объема производства и обеспечат энергоэффективность использования вторичных ресурсов. В дальнейших работах будет произведен расчет надежности рассматриваемой системы электроснабжения с учетом внедренных мероприятий с целью подтверждения прогнозируемых целевых значений.

#### Библиографический список

1. Gazizova O. V., Malafeyev A. V., Kondrashova Y. N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124 (1). P. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012056.
2. Khramshin V. R., Nikolayev A. A., Evdokimov S. A. [et al.]. Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2016. P. 596–600. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448253.
3. Газизова О. В., Соколов А. П., Патшин Н. Т., Кондрашова Ю. Н. Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации // Электротехни-

ческие системы и комплексы. 2019. № 2 (43). С. 12–18. DOI 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18.

4. Храмшин В. Р., Одинцов К. Э., Губайдуллин А. Р. [и др.]. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14, № 2. С. 68–79.

5. Khramshin V. R., Nikolayev A. A., Evdokimov S. A., Kondrashova Y. N., Larina T. P. Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2016. P. 596–600. DOI: 10.1109/EICONRUSNW.2016.7448253.

6. Evdokimov S. A., Kondrashova Yu. N., Karandaeva O. I., Gallyamova M. S. Stationary system for monitoring technical state of power transformer // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 18–25. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.270.

7. Kondrashova Y. N., Khramshin R. R., Nikolaev A. A., Shurygina G. V. Analysis of thermal state of power transformer of captive power plant // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 832–838. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.115.

8. Газизова О. В., Малафеев А. В., Тарасов В. М., Извольский М. А. Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии // Промышленная энергетика. 2012. № 10. С. 12–17.

9. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01–06–2014. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.

10. Бирюлин В. И., Куделина Д. В. Разработка модели оценки состояния изоляции кабельных линий на основе нечеткого логического вывода // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. ст. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ им. П. Е. Алексеева, 2019. С. 156–160.

11. Глазов И. О. Отказы и остаточный ресурс электрооборудования // Синергия наук. 2017. № 14. С. 454–459.

12. Мирошник А. В., Котляр А. А., Пазий В. Г. Математическая модель расхода ресурса электрооборудования // Научный вестник Таврийского державного агротехнологического университета. 2012. № 2-1. С. 225–231.

13. Некрасов А. И., Некрасов А. А., Подобедов П. Н. [и др.]. Оценка остаточного ресурса электрооборудования по физическим характеристикам // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 1 (41). С. 5–11.

14. Дубяго М. Н., Полуянович Н. К. Метод оценки и прогнозирования остаточного ресурса изоляции кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 3 (205). С. 132–143. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-3-132-143.

15. Куделина Д. В., Бирюлин В. И. Нечеткое прогнозирование состояния изоляции электрооборудования // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 11-3. С. 65–68.

16. Щербатов И. А., Гуриянова В. В., Цуриков Г. Н. Определение технического состояния оборудования электроэнергетики // Информационные технологии. Проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. 2018. № 1 (5). С. 341–345.

17. Власов А. Б., Буев С. А. Оценка состояния судового кабеля посредством измерения характеристик его изоляции // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного тех-

нического университета. 2020. Т. 23, № 4. С. 335–344. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-335-344.

18. Спиридонов А. А., Логачева О. В. Прогнозирование технического состояния электрооборудования // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (Саратов, 18 апреля 2016 года) / под общ. ред. Трушкина В. А. Саратов: ООО Центр социальных агроинноваций СГАУ, 2016. С. 222–223.

19. Полуянович Н. К., Дубяго М. Н. Алгоритм обучения искусственной нейронной сети факторного прогнозирования ресурса изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2021. № 2 (219). С. 59–73. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-2-59-73.

20. Пахомов И. К., Дроздов Н. В., Паскарь И. Н. Прогнозирование состояния электрооборудования // Россия молодая: сб. материалов IX Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием / отв. ред. Костюк С. Г., Кемерово: Изд-во КузГТУ имени Т. Ф. Горбачева, 2017. С. 21050.

21. Норицына И. Ю. Прогнозирование оценки технического состояния электрооборудования // Системы компьютерной математики и их приложения. 2017. № 18. С. 107–109.

**КОНДРАШОВА Юлия Николаевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Магнитогорского государственного технического университета (МГТУ) им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск.

SPIN-код: 1627-1094

AuthorID (РИНЦ): 503099

AuthorID (SCOPUS): 57170589400

ORCID: 0000-0002-5280-5666

Адрес для переписки: rotjuil720@mail.ru

**ШАЛИМОВ Алексей Витальевич**, бакалавр гр. АЭБ-19-2 Института энергетики и автоматизированных систем (ИЭиАС) МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск.

Адрес для переписки: shalimov-alexey@mail.ru

**МАРКИНА Ангелина Максимовна**, магистрант гр. АЭСм-21 ИЭиАС МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск.

Адрес для переписки: mam98am@gmail.com

**ТРЕТЬЯКОВ Андрей Максимович**, бакалавр гр. АЭБ-19-2 ИЭиАС МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск.

Адрес для переписки: andreyt2001@yandex.ru

#### Для цитирования

Кондрашова Ю. Н., Шалимов А. В., Маркина А. М., Третьяков А. М. Оценка надежности электрооборудования энергоузла металлургического предприятия для отдельных участков с привязкой к видам технологического производства // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 77–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-77-85.

Статья поступила в редакцию 19.01.2022 г.

© Ю. Н. Кондрашова, А. В. Шалимов, А. М. Маркина, А. М. Третьяков