

Концепция мониторинга и диагностирования электрооборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог

Александр Александрович МАТУСЕВИЧ¹

Резюме

Предложены теоретические подходы и методическое обеспечение решения актуальной научно-технической проблемы повышения качества и эффективности мониторинга и диагностирования электрооборудования тяговых подстанций железных дорог в процессе эксплуатации.

С целью повышения надежности электроснабжения железных дорог и снижения аварийности силового электрооборудования проведено исследование опыта энергетических компаний по вопросам качественного решения проблем электроснабжения железных дорог на основе идеологии Smart Grid технологий. Также проведен анализ основных методов мониторинга и диагностирования устройств ТП электрифицированных железных дорог.

Предложенная концепция мониторинга и диагностирования электрооборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог направлена на повышение надежности работы оборудования и достижения оптимальной эксплуатации его в течение всего жизненного цикла а также снижения расходов на эксплуатацию силового оборудования за счет применения технического обслуживания и ремонта по фактическому техническому состоянию.

Ключевые слова: электроснабжение, электрифицированные железные дороги, мониторинг, Smart Grid, тяговая подстанция, электрооборудование, техническое обслуживание и ремонт, диагностирование, надежность, система, фактическое техническое состояние

1. Вступление

Содержание технических средств железнодорожного транспорта на высоком эксплуатационном уровне, обеспечивающем безопасность движения поездов и высокую эффективность процесса перевозок, невозможно без объективной информации об их фактическом техническом состоянии (ТС).

Постепенное старение парка оборудования, снижение запасов прочности в оборудовании последних поколений остро поставили вопрос оценки его ТС и степени риска эксплуатации оборудования за пределами нормированного срока службы.

За последние 20 лет во многих странах произошла приватизация большого числа электротехнических компаний, производящих, передающих и распределяющих электроэнергию. Развитие свободного рынка электроэнергии и усиливающийся финансовый прессинг стали дополнительными факторами, которые, с одной стороны, усилили возникшую тенденцию максимально возможного продления сроков службы оборудования, а с дру-

гой стороны, потребовали снижения эксплуатационных затрат на его техническое обслуживание и ремонты (ТО и Р). Стремление собственников компаний максимально использовать ресурс имеющегося оборудования, что позволяет минимизировать и отложить инвестиционные вложения на приобретение нового оборудования, вступило в противоречие с необходимостью обеспечения его надежной работы и сведения к минимуму числа аварийных отключений.

В современных экономических условиях развития Украины также растет понимание экономической целесообразности качественной технической диагностики силового электрооборудования системы тягового электроснабжения железных дорог исходя из следующих причин: более половины парка электрооборудования тяговых подстанций (ТП) выработало расчетный ресурс, темпы старения выше темпов обновления парка, необходимость экономии средств на техническое обслуживание.

К примеру, на электрифицированных железных дорогах Украины эксплуатируется 307 ТП,

¹ Канд. техн. наук, доцент; Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта; эл. почта: al m0452@meta.ua.

однако из них 253 ТП имеют срок службы свыше 30 лет, а 216 ТП свыше 40 лет. Распределение тяговых подстанций по сроку эксплуатации в 2004, 2008, 2012, 2013 годах [1], представлено в таблице 1 и рисунке 1.

Таблица 1
Распределение тяговых подстанций по сроку эксплуатации

Тяговые подстанции	Количество	[%] срока эксплуатации (количество)		
		до 30 лет	до 40 лет	больше 40 лет
всего:				
2004 г.	294	24% (72)	36% (105)	40% (117)
2008 г.	301	17% (52)	30% (89)	53% (160)
2012 г.	308	20% (62)	19% (57)	61% (186)
2013 г.	307	18,1%(54)	12,5%(37)	70,4%(216)

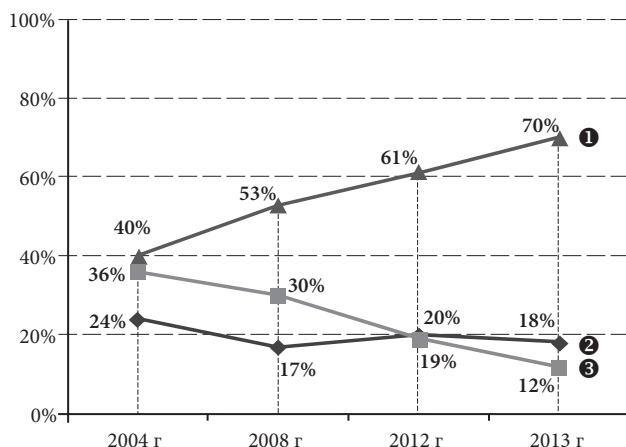


Рис. 1. Распределение тяговых подстанций по сроку эксплуатации: 1) больше 40 лет, 2) до 30 лет, 3) до 40 лет

Данные, приведенные в таблице 1 и на рисунке 1, указывают на постоянное увеличение в эксплуатации числа ТП и их оборудования, которое выработало назначенный ресурс, а темпы и объемы его замены настолько малы, что процесс старения парка ТП и его силового электрооборудования практически не снижается. Данная проблема отрицательно сказывается на эффективности и надежности тягового электроснабжения железных дорог.

2. Основная часть

Поддержание необходимой степени надежности оборудования в процессе его эксплуатации обеспечивается системой технического обслуживания и ремонтов. Целью системы ТО и Р в соответствии с нормативно-технической документа-

цией (НТД) является управление техническим состоянием изделий в течение их срока службы или ресурса до списания, позволяющее обеспечить заданный уровень готовности из изделий к использованию по назначению и их работоспособности в процессе эксплуатации, минимальные затраты времени, труда и средств на выполнение ТО и Р изделий.

Традиционно эта система базируется на проведении плановых профилактических работ после наработки определенного времени (система планово-предупредительных ремонтов). Применительно к устройствам основного силового электрооборудования ТП электрифицированных железных дорог данная система не является оптимальной, так как приводит к неоправданным отключениям работоспособного оборудования, увеличению трудозатрат и экономическим потерям.

Материалы публикаций [3, 4, 5] показывают, что эффективным направлением повышения эксплуатационной надежности электрооборудования, продления ресурса его работы, снижения ремонтных расходов и риска ущерба, продления срока службы оборудования – является использование современных систем непрерывного контроля состояния оборудования (выполненных на базе современных компьютерных и информационных технологий), совершенствование критериев диагностики и методов анализа диагностической информации.

Анализ причин возникновения и проявления дефектов электрооборудования ТП показывает [1, 6], техническое состояние каждого из них характеризуется только присущими данному дефекту индивидуальными и общими признаками. Для каждого типа оборудования характерны свои типичные дефекты, которые многократно встречаются в эксплуатации. Объединив все дефекты и признаки их появления в отдельные группы получим структуру диагностирования электрооборудования, которая состоит из трех уровней и подсистем: проверки функционирования, выявления дефектов, оценки и прогнозирования работоспособности. При этом каждый следующий уровень использует предыдущие результаты.

Техническая диагностика электрооборудования включает у себя два основных направления – оперативную и ремонтную диагностику. В основные задания оперативной диагностики должно входить:

- раннее выявление дефектов на работающем или выведенном из работы для обследования оборудования;
- прогнозирование развития дефектов, оценка их опасности, оценка общего состояния оборудования;

- подготовка рекомендаций относительно дальнейшей эксплуатации и технического обслуживания оборудования (например - немедленное выведение в ремонт, сдвиг сроков плановых ремонтов, работа без ограничений и т.п.).

Ремонтная диагностика осуществляется на выведенном из работы в ремонт оборудовании. В ее основные задания входит:

- локализация дефектов оборудования;
- определение объема ремонтно-обновительных работ вплоть до рекомендации о целесообразности замены оборудования.

В результате диагностирования электрооборудования в процессе эксплуатации осуществляется раннее выявление дефектов и определяется его техническое состояние в текущий момент времени. С точки зрения выбора оптимальной стратегии технического обслуживания и ремонта нужно осуществлять прогноз развития дефектов и перспективную оценку технического состояния на следующий период эксплуатации. Методы прогнозирования реализуются на основании алгоритмов и программ диагностирования электрооборудования. Анализ методов прогнозирования технического состояния оборудования и механизмов показывает что их можно разделить на аналитические, вероятностные и распознавание образов [8].

Метод аналитического прогнозирования позволяет получать параметры оборудования, размерность которых отвечает размерности контролируемых параметров. При этом значения вычисленных параметров характеризуют протекание процесса во времени. Данный метод, как правило, применяется, когда известна аналитическая зависимость функции изменения диагностического параметра во времени.

Особенностью метода вероятностного прогнозирования является определение вероятности сохранения работоспособности оборудования в функции времени, то есть результат прогноза определяет вероятность выхода или невыхода контролируемого диагностического параметра за допустимые пределы. При этом определяются вероятностные характеристики: плотность распределения значений параметров, математическое ожидание и дисперсия.

Метод распознавания образов (статистической классификации) заключается в том, что прогнозирование можно начинать с момента осуществления одноразового контроля оборудования, которое диагностируется. В результате прогноза контролируемый объект относят к тому или другому классу технического состояния, который устанавливается заранее по критерию работоспособности

или долговечности и принимают за эталон (образ). В последующем, исходя из закономерности изменения параметров данного класса, рассчитывают изменение данного параметра при дальнейшей эксплуатации оборудования.

Выбор метода прогнозирования во многом определяется необходимой точностью и достоверностью. При прогнозировании технического состояния электрооборудования ТП должны решаться следующие задачи:

- контроль параметров и признаков изменения технического состояния электрооборудования;
- сравнение диагностических параметров с величинами их нормативных значений;
- нормирование значений диагностических параметров;
- фиксация момента при котором диагностические параметры электрооборудования выходят за допустимые пределы (абсолютное значение и длительность выхода);
- выполнение накопления, отображения и регистрации обрабатываемой информации;
- осуществление первичной обработки диагностической информации о техническом состоянии оборудования;
- вычисление текущих и перспективных значений обобщенных ресурсных показателей технического состояния контролируемого электрооборудования;
- назначение сроков проведения профилактических работ, направленных на повышение уровня работоспособности электрооборудования;
- предоставление информации персоналу ТП о техническом состоянии и рекомендациях о целесообразных изменениях процесса эксплуатации каждой единицы электрооборудования.

Описание математического аппарата некоторых наиболее применяемых методов прогнозирования технического состояния и ресурса электрооборудования приведено в [2, 8]. Методы прогнозирования основываются на результатах контроля технического состояния и реализуются с помощью алгоритмов и программ диагностирования электрооборудования.

Системы технической диагностики электрооборудования представляет собой совокупность объектов и средств, необходимых для проведения диагностики (контроля) в соответствии с правилами, установленными в НТД. Основными задачами диагностики электрических систем ТП должны быть:

- определение технического состояния оборудования в условиях эксплуатационных воздействий, которые постоянно меняются;

- определение типа и степени опасности дефекта;
- прогнозирование остаточного ресурса или срока службы;
- уменьшение вероятности ошибки диагностики;
- увеличение вероятности достоверности диагностики (достоверность контроля);
- сокращение продолжительности оперативной диагностики;
- снижение стоимости диагностики;
- уменьшите расходов на диагностику и т.д.

Например, для определения вероятности ошибки диагностирования можно предложить следующую математическую модель [6]

$$P_{ij} = P_{oi} \sum_{l=1}^k P_{nl} P_{yjl} \quad (1)$$

где: k – количество технических состояний (далее – состояний) устройства диагностирования;
 P_{oi} – априорная вероятность пребывания объекта диагностирования в состоянии i ;
 P_{nl} – априорная вероятность пребывания средства диагностирования в состоянии l ;
 P_{yjl} – условная вероятность того, что в результате диагностирования объект определится таким, который находится в состоянии j при условии, что он находится в состоянии i и средство диагностирования находится в состоянии l .

По статистическим данным оценку вероятности ошибки диагностирования определим по формуле

$$P_{ij}^* = P_{oi} \sum_{l=1}^k P_{nl} P \frac{r_{jil}}{N_{il}} \quad (2)$$

где: N_{il} – общее количество испытаний системы диагностирования (диагностирования объекта, который находится в состоянии i , средством диагностирования, которое находится в состоянии l);

r_{jil} – количество испытаний, при которых система диагностирования зафиксировала состояние j .

Для система диагностирования, предназначенных для проверки работоспособности (то есть при различении только двух состояний объекта диагностирования – работоспособный и неработоспособный), возможны ошибки диагностирования видов ($i = 1, j = 2$) и ($i = 2, j = 1$).

Очевидно, что при $i = 1$ и $j = 2$ состояние объекта работоспособно и ошибка диагностирования отсутствует. При $i = 2$ и $j = 1$ состояние объекта неработоспособно и ошибка диагностирования также отсутствует.

Вероятность ошибки диагностирования вида (1, 2) P_{12} – это вероятность общего наступления

двух событий: объект находится в работоспособном состоянии, но в результате ошибки диагностирования состояние объекта признано неисправным.

Вероятность ошибки диагностирования вида (2, 1) P_{21} – это вероятность общего наступления двух событий: объект находится в неработоспособном состоянии, но в результате ошибки диагностирования он признан работоспособным.

Для рассмотренного отдельного случая вероятности P_{12} и P_{21} вычисляются по формулам

$$P_{12} = P_{o1} \sum_{l=1}^k P_{nl} P_{y21l} \quad (3)$$

$$P_{21} = P_{o2} \sum_{l=1}^k P_{nl} P_{y12l} \quad (4)$$

где P_{o1} – априорная вероятность пребывания объекта диагностирования в работоспособном состоянии;

P_{o2} – априорная вероятность пребывания объекта диагностирования в неработоспособном состоянии;

P_{y21l} – условная вероятность того, что в результате диагностирования объект считается таким, который находится в неработоспособном состоянии при условии, что он находится в работоспособном состоянии и средство диагностирования в состоянии l ;

P_{y12l} – условная вероятность того, что в результате диагностирования объект считается таким, который находится в работоспособном состоянии при условии, что он находится в неработоспособном состоянии и средство диагностирования в состоянии l ;

P_{nl} – априорная вероятность пребывания средства диагностирования в состоянии l .

Используя математические модели [6], можно определить и другие диагностические параметры электрических систем ТП.

В спектре основных задач технической диагностики, первоочередная задача должна заключаться в определении фактического технического состояния оборудования ТП. При установлении факта отказа или дефекта следующий шаг должен быть направлен на поиск места, вида и опасности дефекта, а также определения причины неисправности.

Предложим некоторые технико-технологические подходы к построению системы технического диагностирования ТП [6]. Диагностирование, которое проводится различными техническими средствами, может быть функциональным или тестовым (рис. 2, 3).

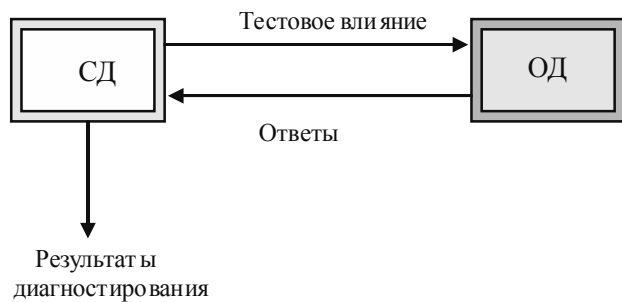


Рис. 2. Система тестового диагностирования

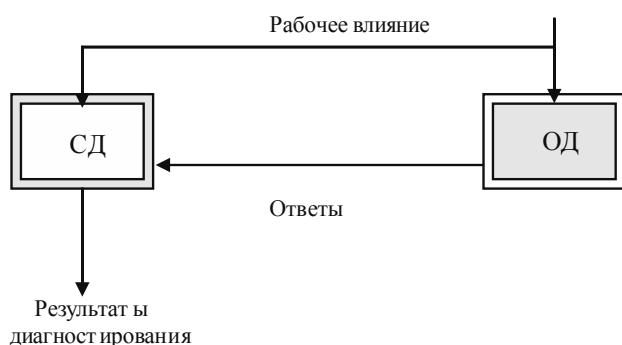


Рис. 3. Система функционального диагностирования

В системах тестового диагностирования на объект диагностирования (ОД) подаются специальные тестовые влияния со стороны средств диагностирования (СД). Другие влияния на ОД отсутствуют. Поэтому, как состав, так и последовательность подачи этих влияний можно выбрать исходя из условий эффективной организации процесса диагностирования. При этом каждое следующее влияние можно назначать в зависимости от ответов объекта на предыдущие влияния. Влияние в такой системе называют тестовыми.

Тестовые влияния могут подаваться как в периоды времени, когда объект не используется по прямому назначению, так и в процессе выполнения им его рабочего алгоритма функционирования. Во втором случае, тестовыми влияниями могут быть только такие сигналы, которые не мешают нормальной работе объекта. Тестовые действия могут подаваться как на основные входы объекта, то есть на его входы, необходимые для применения объекта по назначению, так и на дополнительные входы, организованные специально для диагностических целей.

В системах функционального диагностирования СД не формирует влияний на ОД. На ОД и СД определяют рабочие влияния, какие предусмотрены алгоритмом функционирования объекта. Система диагностирования действует в процессе рабочего функционирования ОД и решает задачи правильности функционирования и поиска неис-

правностей, которые нарушают нормальное функционирование.

В системах обоих видов средств диагностирования воспринимают и анализируют ответы объекта на входные (тестовые или рабочие) влияния и формируют результат диагностирования, то есть ставят диагноз: объект исправный или неисправный, работоспособный или неработоспособный, функционирует правильно или неправильно, имеет какой-либо дефект или в объекте повреждена какая-то его составляющая.

Следующим шагом повышения эффективности и качества мониторинга и диагностирования основного силового электрооборудования ТП электрифицированных железных дорог может служить использование систем непрерывного контроля (мониторинга) технического состояния основного оборудования ТП [6, 7, 9, 10].

Применение систем непрерывного контроля (СНК) в мировой практике стало общепринятым при модернизации действующих и строительстве новых подстанций. Однако, существующий подход к внедрению СНК сводится, в большинстве случаев, только к мониторингу силового оборудования (трансформаторы, автотрансформаторы, реакторы) или к внедрению разрозненных систем диагностики силового, измерительного, защитного оборудования. Такой принцип внедрения СНК не всегда позволяет обеспечить высокие требования к надежности диагностической информации, поскольку использование разрозненных систем, как правило, приводит к недостаточности информации от первичных датчиков и необоснованного увеличения расходов на систему мониторинга в силу необходимости дублирования первичных датчиков и средств измерения.

Комплексная система непрерывного контроля должна строиться с использованием единственного центрального контролера ТП, который выполняет функции сбора, обработки, хранения и выдачи диагностической информации и необходимого количества вторичных преобразователей без дублирования первичных датчиков. Таким образом, комплексный подход к мониторингу основного силового электрооборудования ТП позволяет получить следующие преимущества [6, 9, 10]:

- исключить дублирование первичных датчиков и соответственно уменьшить их общее количество приблизительно на 40%;
- уменьшить суммарное количество входных каналов вторичных средств измерения приблизительно на 30–50%;
- повысить достоверность диагностики за счет использования дополнительной информации, полученной от других подсистем (например, сигналы от измерительных обмоток трансфор-

маторов напряжения всегда заводятся в систему мониторинга силового трансформатора и, как правило, не заводятся в системы контроля изоляции вводов и трансформаторов тока. Использование этого сигнала, в отмеченных системах, значительно повысит точность диагностической информации);

- повысить удобство и эффективность диагностики за счет возможности использования единственного сервера с комплексной программной оболочкой для выдачи информации персоналу ТП и возможностью интеграции в системы планирования ремонтов и обслуживание верхнего уровня (АСУ ТО и Р).

Необходимо отметить, что при комплектации ТП современными системами мониторинга экономически и технически целесообразно рассматривать в качестве объекта диагностики подстанцию и распределительное устройство в целом. В этом случае удельные расходы на каждый объект диагностики будут минимальными. Однако, с учетом ограничений в финансировании, целесообразно устанавливать мониторинг на наиболее дорогом и ответственном электрооборудовании ТП с возможностью дальнейшего расширения перечня контролируемого оборудования. На начальном этапе внедрения, такой подход приведет к незначительному подорожанию системы непрерывной диагностики, приблизительно на 10-15 %, с последующей окупаемостью в случае дальнейшего наращивания числа подсистем [6]. Создание и внедрение комплексных систем мониторинга оборудования ТП является основой для создания интеллектуальных электроэнергетических систем тягового электроснабжения железных дорог (Smart Grid системы).

3. Выводы

Главной задачей решения вышерассмотренной проблемы является - создание интеллектуальной системы мониторинга и диагностирования электрооборудования ТП, на основе мирового опыта построения интеллектуальных сетей **Smart Grid**, осуществляющей достоверную, процессную, многоаспектную оценку технико-экономического состояния оборудования с использованием новых методов и критериев оценки, которые повышают оперативность и качество организации диагностирования, технического обслуживания и ремонта электрооборудования тяговых подстанций электрифицированных железных дорог.

При этом совершенствование критериев диагностики и методов анализа диагностической ин-

формации с позиций интеллектуальной системы Smart Grid, повысит объективность оценки технического состояния оборудования ТП, что позволит качественно планировать и своевременно проводить необходимые операции ТО и Р, в результате чего повысится эксплуатационная надежность электрооборудования ТП, будет продлен ресурс его работы, экономятся средства и снизится риск ущербов.

Литература

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році [Текст] / – К.: Видавництво ТОВ «Девалта», 2014. - 251 с.
2. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В.В. Болотин – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
3. Единая Система Мониторинга и Диагностирования (Хозяйство электрификации и электроснабжения) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.google.com.ua/www.transset.ru/index.php/esmde>. - Загл. с экрана.
4. Leibfried, Thomas. Online Monitors Transformers in Service [Text]. \ IEEE Computer Applications in Power, July 1998. P. 36-42.
5. Матусевич, О.О., Багатоаспектна оцінка технічного стану силового устаткування тягових підстанцій [Текст] / О. О. Матусевич, В. Г. Сиченко // Энергосбережение на ж.д. транспорте и в промышленности (Воловець, 11.06 - 14.06.2013): тез. IV міжнародн. наук.- практ. конф. / МОН України, Дніпропетр. нац. ун-т заліз. транспорт. ім. акад. В Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2013. – С. 78-80.
6. Матусевич О.О., Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій [Текст]: монографія / О. О. Матусевич. – Дніпропетровськ :Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 295 с.
7. Матусевич О.О., Сучасні підходи з технічного обслуговування та ремонту обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць на основі Smart-технологій [Текст] / О. О. Матусевич // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - 2014. - № 4. - С. 75-85.
8. Мозгалеvский, А.В. Техническая диагностика (Непрерывные объекты) [Текст] / А.В.Мозгалеvский, Д.В. Гаскаров - М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.
9. Рассальский, А.Н. Основные принципы непрерывного контроля высоковольтного масляного электрооборудования с изоляцией

конденсаторного типа под рабочим напряжением [Текст] / А.Н. Рассальский, А.А. Сахно, С.П. Конограй, А.Г.Спица, А.А Гук // Электро-механічні і енергозберігаючі системи. – 2009, – № 2. – С. 53-55.

10. Хренников, А.Ю. Системы мониторинга и опыт диагностики состояния электротехнического оборудования в ОАО „САМАРАЭНЕРГО” [Текст] / А.Ю. Хренников, А.С. Петров, Г.В. Цыгикало, В.В. Щербаков, С.А. Языков // ЭЛЕКТРО. –2004, – №2 .– С.32-38.

Konceptja monitoringu i diagnostyki elektrycznego wyposażenia kolejowych podstacji trakcyjnych

Streszczenie

W artykule pokazano teoretyczne i metodologiczne podejście w celu zwiększenia jakości i efektywności monitorowania i diagnozowania wyposażenia elektrycznego podstacji trakcyjnych w eksploatacji.

W celu zwiększenia niezawodności zasilania linii kolejowych i ograniczenia awaryjności wyposażenia elektrycznego podstacji trakcyjnych, prześlędzono doświadczenia spółek energetycznych w technologii sieci inteligentnych Smart Grid. Przeprowadzono także analizę głównych metod monitorowania i diagnozowania urządzeń podstacji trakcyjnych.

Proponowana koncepcja monitorowania i diagnostyki elektrycznego wyposażenia podstacji ma na celu poprawę niezawodności sprzętu i jego optymalnej pracy w całym cyklu życia, a także obniżenie kosztów eksploatacji urządzeń energetycznych przez wykorzystanie konserwacji i naprawy rzeczywistego stanu technicznego.

Słowa kluczowe: zasilanie trakcyjne, linie kolejowe, monitoring, Smart Grid, podstacja trakcyjna, wyposażenie elektryczne, konserwacja i naprawy, diagnostyka, niezawodność systemu, rzeczywisty stan techniczny

Concept of Monitoring and Diagnosis Electric Fixtures of Railway Sub-station of Electrified Railways

Summary

Theoretical approaches and methodological support of the solution the actual scientific and technical problem of quality improvement and monitoring efficiency and electric equipment diagnosing of railroads railway substations while in operation are offered. In order to improve electric power supply reliability and reduce the power equipment fault rate undertook a study experience of the energy companies for high quality problem solution of electric power supply based on the ideology of Smart Grid technologies. Also, the analysis of the monitoring main methods and diagnosing TP devices of electrified railways is carried out. The offered concept of monitoring and diagnosing of electric equipment of railway substations of the electrified railroads is focused on reliability growth of equipment operation and achievement of optimum use it throughout life cycle, and also expenditures lowering on operation of the power equipment due to application of technical servicing and repair on the condition monitored maintenance.

Keywords: electric power supply, electrified railways, monitoring, Smart Grid, railway sub-station, power equipment, technical servicing and repair, diagnosis, reliability, system, condition monitored maintenance