

УДК 661.331:621.311

Запропоновани методологічні підходи щодо врахування надійності регулюючих пристроїв систем електропостачання тяги поїздів постійного струму при регулюванні їх режимів

Ключові слова: надійність, структурно-логічна схема, показники надійності, відмови

Предложены методологические подходы к учёту надёжности регулировочных устройств систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока при регулировании их режимов

Ключевые слова: надёжность, структурно-логическая схема, показатели надёжности, отказы

This article offered the methodological approach to the accounting the reliability of regulation devices of DC traction power supply systems during regulation of their regimes

Key words: reliability, structural logical scheme, failures

УЧЁТ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ИХ РЕЖИМОВ

В. Г. Кузнецов

Кандидат технических наук, доцент, докторант
Кафедра "Электроснабжение железных дорог"

Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта

им. акад. В. А. Лазаряна

ул. акад. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск,

Украина, 49010

Контактный тел.: (0562) 793-19-21

E-mail: vkuz@i.ua

Введение

Энергосбережение на железнодорожном транспорте в условиях рыночной экономики является одним из основных приоритетов научно-технической политики Укрзалізничці. Энергосбережение и рационализацию технологических процессов во всех службах и хозяйствах железнодорожного транспорта можно рассматривать как главный внутренний резерв железнодорожного транспорта в ближайшей перспективе.

Повышение конкурентоспособности и экономичности работы железнодорожного транспорта Украины невозможно без решения ряда первоочередных проблем: обеспечение рациональной технологии перевозочного процесса по энергетическим, экономическим и экологическим критериям; развитие инфраструктуры железнодорожного транспорта для обеспечения скоростного движения; совершенствование подвижного состава; планирование потребления энергетических ресурсов; внедрение эффективных методов управления железнодорожным транспортом на всех уровнях производственного цикла. Среди этих первоочередных задач железнодорожного транспорта своё место занимает задача определения рациональных режимов систем электроснабжения тяги поездов.

Эффективность управления режимами систем электроснабжения тяги поездов существенно зависит от надёжности регулировочных устройств (особенно на этапе интенсивного износа силового оборудования). В хозяйстве электроснабжения и электрификации Укрзалізничці организован сбор информации об отказах силового оборудования на основе [5]. В регулировании

режимов системы тягового электроснабжения участвует следующее оборудование:

1. Высоковольтные выключатели переменного тока
2. Разъединители
3. Быстродействующие выключатели постоянного тока
4. Устройства регулирования напряжения под нагрузкой или вольтодобавочные устройства

Цель статьи – разработка методологических основ учёта надёжности переключающих устройств при осуществлении регулирования режимов систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока

Высоковольтные выключатели переменного тока

В устройствах электроснабжения железных дорог наиболее часто применяются масляные, элегазовые и вакуумные выключатели. Техническое состояние масляных выключателей состояние масла и степень износа контактов выключателя. Диэлектрическая прочность масла понижается с ростом числа отключений коротких замыканий. Со временем развивается подгар контактов выключателя. Это приводит к последующему увеличению переходного электрического сопротивления.

Диэлектрическую прочность масла и фактический износ контактов в процессе эксплуатации трудно контролировать. Поэтому в дистанциях электроснабжения нашёл применение интегральный параметр - сумма отключаемых токов. Для измерения суммы отключенных токов применяется сумматор ФСТКЗ-76.

К сожалению, нет систематического научного исследования по надёжности коммутационного оборудования систем электроснабжения железных дорог. Однако множество публикаций было посвящено надёжности коммутационного оборудования в системах внешнего электроснабжения [11,15,12,7]. В [7] было показано, что параметр потока отказов коммутационного оборудования имеет сложную структуру, кроме того, зависящую от длительности эксплуатации оборудования, и приводит к многократным разбросам значений рассматриваемого параметра: в 2–6 раз по компонентам и в 4–5 раз по сроку эксплуатации.

Разъединители

Характер физических процессов деградации разъединителей при их эксплуатации зависит от места установки (наружная или внутри помещения).

В процессе эксплуатации у разъединителей систем тягового электроснабжения могут наблюдаться [8]:

- ослабление крепления контактов на изоляторах;
- смещение подвижного контакта относительно оси неподвижного;
- ослабление соединения шин с неподвижным контактом, заземления с разъединителем;
- изменение плотности соприкосновения подвижного и неподвижного контактов, допустимые значения вытягивающего усилия не должны превышать заданных значений;
- одновременность касания ножей с губками трехфазного разъединителя, граница поля допуска - 3 мм;
- отклонения времени замыкания и размыкания блок-контактов;
- излом пластин гибкой связи вала заземляющих ножей с каркасом разъединителя;
- эрозия, коррозия и окисление мест контакта ножа и губки;
- загрязнение и растрескивание изоляторов.

Для описания надёжности разъединителей обычно используются следующие показатели:

средняя наработка на отказ (циклов включение-отключение) - в среднем не менее 2000;

механический ресурс разъединителей и приводов (циклов включение-отключение) – в среднем не менее – 10000;

Средний ресурс до капитального ремонта.

Для построения модели надёжности переключающих устройств в задачах управления режимами системы тягового электроснабжения в качестве показателя надёжности разъединителей наиболее подходит средняя наработка на отказ.

Быстродействующие выключатели постоянного тока

В хозяйстве электроснабжения и электрификации железных дорог Укрзалізницею эксплуатируются выключатели АБ-2/4, ВАБ –28, ВАБ-43, ВАБ-48, ВАБ-206. Быстродействующие выключатели имеют наибольшее число повреждений среди оборудования тяговых подстанций постоянного тока. Процесс гашения дуги постоянного тока более сложный, чем дуги переменного тока. На постоянном токе нельзя по-

гасить дугу в момент перехода тока через нуль в какой-либо специальной среде. Для улучшения дугогашения в системе тягового электроснабжения железных дорог для фидеров применяют последовательное включение выключателей постоянного тока.

В качестве показателя наработки, который определяет техническое состояние быстродействующего выключателя, удобно использовать количество отключений и суммарную энергию, которая выделяется в дугогасительной камере. Число отключений непосредственно влияет на степень износа элементов и приводит к изменению токов уставки. Энергия, выделившаяся в дугогасительной камере, вызывает повышение тока утечки и износ главных контактов.

В соответствии с действующей инструкцией по техническому обслуживанию устройств тяговых подстанций [6] ремонт быстродействующих выключателей по техническому состоянию производится:

- после отказы в работе или повреждении;
- для выключателей АБ-2/4 и ВАБ-43 с одним разрывом - после 40 отключений;
- для выключателей с двумя разрывами (ВАБ-28) или сдвоенных выключателей - после 80 отключений;
- для выключателей АБ-2/4, АБ-2/3, ВАБ-2 - при уменьшении зазора δ на 0,5 мм ;
- для выключателей ВАБ-43, ВАБ-49, установленных на тяговых подстанциях, оборудованных устройствами для шунтирования реакторов, которые имеют фиксаторы - сумматоры отключённого тока, ремонт выполняется через 1000 кА отключённого тока с измерением параметров и сопоставлением их с допустимыми.

Устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН)

Вероятность безотказной работы оборудования РПН зависит от надёжности тех элементов, которые определяют его непосредственное функционирование. С точки зрения физики отказов, к ним можно отнести регулировочную обмотку, обмотку контактора и обмотку токоограничивающих устройств, контактную систему, механические детали и узлы.

В первом приближении можно воспользоваться данными инструкций заводов-изготовителей РПН или требованиями ГОСТ 24126-80 «Устройства регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой. Общие технические условия» [1]. В соответствии с [1] безотказная наработка устройств РПН должна быть не менее 35000 переключений.

Структурно-логическая схема для расчёта надёжности системы тягового электроснабжения в задачах регулирования режимов

Учёт надёжности системы тягового электроснабжения в задачах регулирования режимов удобно осуществлять предварительно составив структурно-логическую схему [13]. По данной схеме можно проследить как влияет на уровень надёжность всей системы составляющие её элементы [14]. Составим структурно-

логическую схему расчёта показателей надёжности системы тягового электроснабжения при регулировании её режимов. В данной схеме учитываем лишь те элементы, которые участвуют в процессе регулирования режимов системы электроснабжения, остальные элементы считаем абсолютно надёжными. В данной схеме элементы 1,2,5 представляют высоковольтные выключатели переменного тока, элементы 3,4 – устройства РПН понизительных трансформаторов, элементы 6,7 – выключатели переменного тока, 8,9 - устройства РПН преобразовательных трансформаторов, элементы 10,11 – быстродействующие выключатели постоянного тока, элемент 12 представляет систему телемеханики. Элементы 13 и 15- ППС, элемент 14- ПСК. Схема, приведенная на рис. 1 относится к сложным структурно-логическим схемам и может быть сведена путём преобразований к эквивалентной мостовой схеме можно, воспользовавшись методом разложения относительно особого элемента [13].

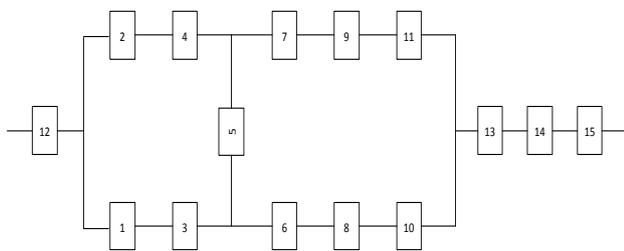


Рис. 1. Структурно-логическая схема расчёта надёжности системы тягового электроснабжения при регулировании режимов

Принципиальная схема ПСК и ППС приведена на рис. 2.

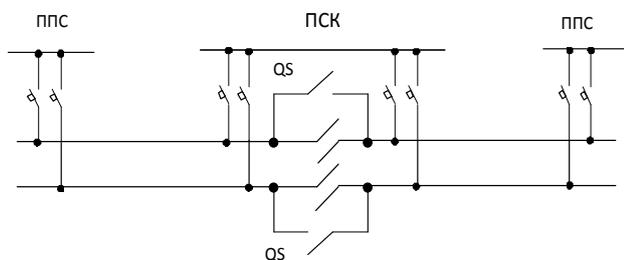


Рис. 2. Упрощённая принципиальная схема ПСК и ППС

Можно считать, что все выключатели, которые входят в состав ПСК и ППС соединены по надёжности последовательно, т.к. при отказе любого выключателя наступит отказ подсистемы «ПСК-ППС».

В ранних публикациях автора было предложено в целевой функции ввести соответствующее слагаемое U для учёта ущерба от возможных отказов при регулировании режимов [10]. Для расчёта значения целевой функции на каждом шаге модельного времени необходимо рассчитать экономический ущерб от возможного отказа силового оборудования, которое участвует в регулировании режимов системы электроснабжения. Для определения экономического ущерба от возможных отказов необходимо иметь информацию о вели-

чине потока отказов системы элементов, участвующих в регулировании. Рассмотрим возможные ситуации, возникающие в процессе регулирования режимов и определим соответствующие значения параметра потока отказов.

Подстанция работает в однотрансформаторном режиме, осуществляется переключение на параллельную работу понизительных трансформаторов.

В данном случае переключение на параллельную работу понизительных трансформаторов осуществляется с помощью разъединителей и высоковольтных выключателей (т.к. величина параметра потока отказов для разъединителей намного меньшая по сравнению с величиной потока отказов выключателей переменного тока в структурно-логической схеме разъединители не учитываем). Суммарная величина параметра потока отказов для подсистемы переключения понизительных трансформаторов на параллельную работу может быть определена по следующему выражению (в предположении, что все элементы работают в установившемся периоде эксплуатации).

$$\omega_{\text{парпт}} = \omega_2 + \omega_5 \tag{1}$$

где $\omega_{\text{парпт}}$ - величина параметра потока отказов подсистемы переключения на параллельную работу понизительных трансформаторов.

Подстанция работает в однотрансформаторном режиме, осуществляется переключение на параллельную работу преобразовательных трансформаторов

В данном случае подключение в работу преобразовательного трансформатора вместе с преобразовательным агрегатом осуществляется с помощью выключателя переменного тока 7 и выключателя постоянного тока 11. Суммарная величина параметра потока отказов для подсистемы переключения преобразовательных трансформаторов на параллельную работу может быть определена по следующему выражению

$$\omega_{\text{парпт}} = \omega_7 + \omega_{11}, \tag{2}$$

где $\omega_{\text{парпт}}$ - величина параметра потока отказов подсистемы переключения на параллельную работу преобразовательных трансформаторов.

Необходимо отметить, что в случаях перехода с двухтрансформаторного на однотрансформаторный режим могут применяться те же формулы.

Подстанция работает в однотрансформаторном режиме, осуществляется регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции с помощью РПН понизительных трансформаторов и РПН преобразовательных трансформаторов

В данном случае надёжность работы тяговой подстанции будет определяться надёжностью РПН (остальные элементы во время регулирования считаем абсолютно надёжными)

$$\omega_U = \omega_3 + \omega_8, \tag{3}$$

где ω_U - величина параметра потока отказов подсистемы регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций с помощью устройств РПН.

Подстанция работает при параллельно включённых понизительных трансформаторах и при парал-

тельно включённых преобразовательных трансформаторах, осуществляется регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции с помощью РПН понижительных трансформаторов и РПН преобразовательных трансформаторов.

В этом случае структурно-логическая схема будет иметь следующий вид:

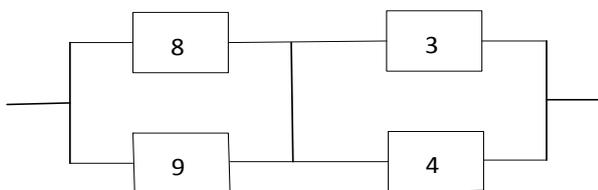


Рис. 3. Структурно-логическая схема расчёта надёжности подсистемы регулирования напряжения для случая параллельной работы понизительных и преобразовательных трансформаторов

Данная схема относится к классу сложных последовательно-параллельных схем. Определить суммарную величину потока отказов подсистемы регулирования напряжения в данном случае можно с помощью метода преобразования исходной схемы. Структурно-логические схемы, в которых присутствует параллельное соединение удобно рассчитывать определив сначала вероятности отказов такой системы. В формулах для удобства опускаем аргумент наработки.

$$P_{34} = 1 - Q_3 Q_4, \quad (4)$$

где P_{34} - вероятность безотказной работы квазиэлемента 34, образованного параллельным соединением элементов 3 и 4;

Q_3 и Q_4 - вероятности отказов элементов 3 и 4 соответственно.

Аналогично можно записать

$$P_{89} = 1 - Q_8 Q_9, \quad (5)$$

где P_{89} - вероятность безотказной работы квазиэлемента 89, образованного параллельным соединением элементов 8 и 9;

Q_8 и Q_9 - вероятности отказов элементов 8 и 9 соответственно.

Суммарная вероятность безотказной работы подсистемы регулирования напряжения с помощью устройств РПН может быть определена по следующему выражению:

$$P_U = P_{34} P_{89} = (1 - Q_3 Q_4)(1 - Q_8 Q_9), \quad (6)$$

где P_U - вероятность безотказной работы подсистемы регулирования напряжения.

Вероятность возникновения отказа определится следующим образом

$$Q_U = 1 - P_U = 1 - (1 - Q_3 Q_4)(1 - Q_8 Q_9), \quad (7)$$

где Q_U - вероятность безотказной работы подсистемы регулирования напряжения.

Сделаем предположение, что все элементы работают в установившемся периоде эксплуатации, тогда для каждого элемента для описания характера возникновения отказов можно использовать экспоненциальную модель. В таком случае вероятность возникновения отказа можно определить так

$$Q_U(t) = 1 - \left(1 - (1 - e^{-\omega_3 t})(1 - e^{-\omega_4 t})\right) \left(1 - (1 - e^{-\omega_8 t})(1 - e^{-\omega_9 t})\right). \quad (8)$$

В том случае, когда элементы, участвующие в регулировании напряжения на шинах ТП идентичны по надёжности ($\omega_3 = \omega_4 = \omega_8 = \omega_9 = \omega_{\text{РПН}}$) формула может быть упрощена

$$Q_U(t) = 1 - \left(1 - (1 - e^{-\omega_{\text{РПН}} t})^2\right)^2, \quad (9)$$

Ещё раз подчеркнём, что в качестве наработки на отказ t здесь понимается количество коммутаций.

Случай переключения схемы питания контактной сети на параллельную схему со схемы двухстороннего питания

В случае, когда осуществляется только переключение схем питания контактной сети надёжность подсистемы регулирования «контактная сеть» зависит от надёжности коммутационной аппаратуры ППС и ПСК. Очевидно, что с точки зрения надёжности ППС и ПСК соединены последовательно, т.к. отказ какого-либо элемента приводит к отказу всей системы. Суммарная величина параметра потока отказов в данном случае будет равняться

$$\omega_{\text{кв}} = \omega_{13} + \omega_{14} + \omega_{15}, \quad (10)$$

где $\omega_{\text{кв}}$ - параметр потока отказов подсистемы регулирования схем питания контактной сети.

В тех случаях, когда осуществляется переход на узловую схему питания надёжность рассматриваемой подсистемы регулирования будет определяться только надёжностью ПСК. В случае переключения с параллельной схемы на узловую надёжность рассматриваемой подсистемы регулирования будет определяться надёжностью двух ППС.

Общий экономический ущерб можно разбить на четыре составляющие по типу регулирующих воздействий

$$Y = Y_U + Y_{\text{ПТ}} + Y_{\text{ТТ}} + Y_{\text{кв}} \quad (11)$$

Y_U - составляющая ущерба, вызванная ненадёжностью силового оборудования, задействованного в регулировании напряжения на шинах тяговых подстанций;

$Y_{\text{ПТ}}$ - составляющая ущерба, вызванная ненадёжностью силового оборудования, задействованного в переключении понизительных трансформаторов на параллельную работу;

$Y_{\text{ТТ}}$ - составляющая ущерба, вызванная ненадёжностью силового оборудования, задействованного в переключении преобразовательных агрегатов тяговых подстанций на параллельную работу;

$U_{кс}$ - составляющая ущерба, вызванная ненадёжностью силового оборудования, задействованного в переключении схем питания контактной сети;

Для учёта экономического ущерба от возможных отказов при регулировании режимов системы тягового электроснабжения необходимо прежде всего описать все возможные ситуации, которые могут возникнуть при регулировании, определить степень риска, просчитать стоимость операций по ликвидации отказов, стоимость остановки или простоя поездов в пути следования (для отказов связанных с фактами простоя или остановки поездов).

Вывод

Определены методологические подходы к учёту надёжности регулировочных устройств системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока при осуществлении регулирования режимов. Составлена структурно-логическая схема расчёта показателей надёжности системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока для определения суммарной интенсивности потока.

Литература

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення [Текст] / -К.:Держстандарт України, 1994.-76с.
2. Практичні рекомендації з технолого-економічного управління експлуатаційною роботою залізниць. ЦД-0068 : Затв. Наказом Укрзалізниця від 10.11.2006 №412-Ц [Текст] / розроб. В.О. Шиш.-К.:Мін-во трансп. та зв'язку України. Держ. адмін. заліз. трансп. України. Укрзалізниця. Голов. упр. перевезень,2007.-56с.
3. Технологічні карти з капітального, поточного ремонтів і профілактичних випробувань специфічного обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць [Текст] / розроб. ВАТ „Укртранспроект”.-К.:Укрзалізниця. Головне управління електрифікації та електропостачання,2008.-107с.
4. Рекомендації з техніко-економічних розрахунків окремих показників експлуатаційної роботи залізниць. ЦД-0037: Затв. Наказом Укрзалізниця від 18.06.2001 № 329-Ц [Текст] / розроб. О.Ф. Вергун, Л.Ю. Гаркуша.-К. Транспорт України,2001.-64с.
5. Інструкція з класифікації, розслідування, обліку та аналізу порушень нормальної роботи пристроїв електропостачання залізниць. ЦЕ-0013: Затв.: Наказ Укрзалізниця від 19.12.2005 р. № 408-Ц [Текст] / Головне управління електрифікації та електропостачання.-К.:Мін-во трансп. України. Держ. адмін. заліз. трансп. України. Укрзалізниця,2006.-36с.
6. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць. ЦЕ-0024 : затверд. Наказом Укрзалізниця від 21.12.2007р. №618-Ц. [Текст] / розроб. ВАТ „Укртранспроект”.-К.:Укрзалізниця,2007.-106с.
7. Абдурахманов,А.М. Разработка моделей надёжности коммутационного оборудования и рекомендаций по их применению в задачах электроэнергетики [Текст]:Автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / А.М. Абдурахманов:[ГОУ МЭИ].-М.:2008.-20 с.
8. Ефимов, А. В.Надёжность и диагностика систем электроснабжения железных дорог [Текст] / А.В. Ефимов, А.Г. Галкин.-М.:УМК МПС России,2000.-512с.
9. Гусарова,Е.В. Экономическое обоснование эффективности проектных решений и внедрения новой техники на железнодорожном транспорте [Текст]: учеб. пособие / Е.В. Гусарова.-Хабаровск:Изд.-во ДВГУПС,2008.-157с.
10. Бітюков,С.Д. Оптимізація споживання електроенергії на електричному транспорті з використанням інформації автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії [Текст] / С.Д. Бітюков, В.Г. Кузнецов, В.Г. Сиченко // Проблеми загальної енергетики.-2011.-№3(26).-С.39-44.
11. Brown, R. E.Electric power distribution reliability [Текст] / R.E. Brown.-New York:CRC Press,2009.-463с.
12. Reliability evaluations of railway power supplies by fault-tree analysis [Текст] / Chen, S K, Ho, T K, and Mao, B H // Electric Power Applications, IET.-2007.-№2.-С.161-172.
13. Кузнецов,В.Г. Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання [Текст]: навчальний посібник / В.Г. Кузнецов, О.Г. Галкін, О.В. Єфімов, О.О. Матусевич.-Дн-ськ:Вид-во Маковецький,2009.-248с.
14. Матусевич,О.О. Аналіз впливу показника рівня захисту від загроз на надійність комплексів телемеханічного керування пристроями тягового електропостачання [Текст] / О.О. Матусевич, В.Г. Кузнецов, В.Г. Сиченко // Залізничний транспорт України.-2008.-№2.-С.32-36.
15. Sagareli, S.Traction power systems reliability concepts [Текст] / S. Sagareli // Rail Conference, 2004.Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint.-6-4-2004.-С.35-39.