

УДК 621.314

Н. А. Алексеев, П. Ю. Булыкин, Е. Ю. Змазов, В. Н. Карпов, Н. Г. Лозинова,
А. М. Матинян, М. В. Пешков, О. В. Сулова

Оценка надёжности нового высоковольтного вентильного оборудования ПС Выборгская

Приводятся результаты схемных решений нового высоковольтного вентиля для модернизации ПС Выборгская. Рассчитывается надёжность нового вентиля. Показано, что новый вентиль имеет показатели надёжности не ниже мировых.

Ключевые слова: высоковольтный вентиль, надёжность, эксплуатационный ресурс, методика оценки надёжности.

Введение

Высоковольтные тиристорные вентили для передач и вставок постоянного тока представляют собой сложное дорогостоящее оборудование. Экономический эффект от применения высоковольтных вентилях зависит от потерь в вентиле, эксплуатационных расходов, наработки на отказ и срока их службы. Оборудование в электроэнергетике должно иметь эксплуатационный ресурс не менее 25 лет.

Выборгская преобразовательная вставка постоянного тока эксплуатируется более 35 лет. В целом этот объект имеет высокую надёжность, но достигается это за счёт увеличенных эксплуатационных расходов. Основной причиной вынужденных простоев блоков Выборгской преобразовательной вставки являются течи деионизованной воды.

В настоящее время АО «НТЦ ФСК ЕЭС» совместно с ОАО «НИИПТ» и ОАО «Айдис групп» разрабатывают новый высоковольтный вентиль. Целью разработки является замена выработавшего свой ресурс вентильного оборудования ПС Выборгская и создание надёжного прототипа для будущих передач постоянного тока.

Новый вентиль с одной стороны должен быть не хуже современных решений, а с другой, «вписаться» в существующую компоновку вентильного зала и интегрироваться в существующие системы управления, регулирования и регистрации аварийных процессов.

В данной статье оценивается надёжность нового высоковольтного вентиля, а также вставок и передач на его основе.

1. Структура нового вентиля блока вентилях преобразовательного моста БВПМ

Общая структура БВПМ

Блок-схема БВПМ представлена на рис. 1.

БВПМ состоит из двух высоковольтных тиристорных вентилях (ВТВ) преобразовательного моста. Один ВТВ подключен между катодом и фазой, другой – между анодом и фазой.

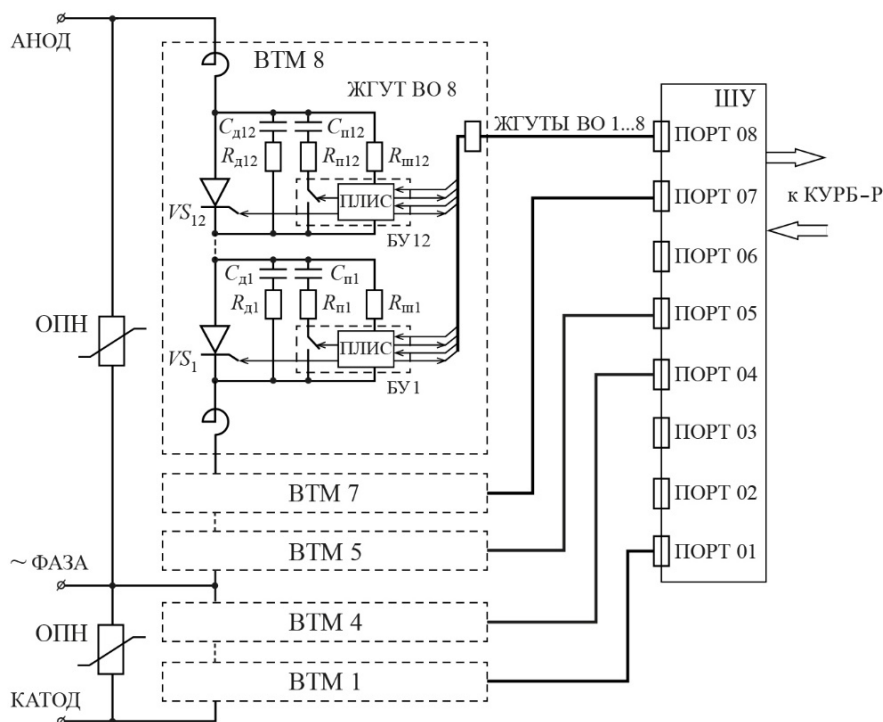


Рис. 1. Блок-схема ВВПМ:

VS_1 – VS_{12} – тиристоры; $C_{дi}$, $R_{дi}$ – конденсатор и резистор демфирующей цепочки;
 $C_{пi}$, $R_{пi}$ – элементы цепи отбора мощности для питания драйвера;
 $R_{шi}$ – шунтирующее сопротивление ($i = 1, \dots, 12$ по количеству тиристоров в ВТМ);
 ШУ – шкаф управления; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;
 КУРБ-Р – комплекс аппаратуры регулирования и защиты преобразовательного блока (реверсивный)

В состав ВТВ входят:

- 4 высоковольтных тиристорных модуля (ВТМ);
- рамная изолирующая конструкция;
- система передачи и распределения импульсов управления тиристорами;
- система теплоотвода потерь, выделяемых в элементах блока;
- комплект внутренней ошиновки для последовательного подключения ВТМ;
- ограничители перенапряжений (ОПН).

1.1. Высоковольтный тиристорный модуль

Высоковольтный тиристорный модуль представляет собой конструктивно законченное устройство, состоящее из последовательно соединённых двух дросселей насыщения и тиристорной сборки.

Тиристорная сборка состоит из последовательно соединённых 12 тиристоров типа T283-1600-60 и 13 охладителей с единым прижимным устройством, блока конденсаторов (БК), резисторов цепей деления напряжения между тиристорными ячейками. В тиристорный модуль также входит стойка с блоками управления (БУ) и узлами высоковольтной защиты (ВЗ), два коллектора с трубками для подвода (отвода) охлаждающей жидкости к охладителям и дросселям насыщения.

1.2. Тиристорная ячейка (ТЯ)

Тиристорная ячейка – это часть оборудования модуля вентиля, рабочее напряжение которой определяется классом тиристора. Оборудование ТЯ функционирует автономно от других ячеек. Синхронность включения тиристоров обеспечивается синхронностью сигналов управления на БУ тиристоров.

Тиристорная ячейка включает в себя:

- тиристор (Т);
- комплект резисторов R и RC цепей;
- конденсаторы RC цепи;
- блок управления (БУ);
- устройство высоковольтной защиты ВЗ.

1.3. Блок управления тиристором (БУ)

Функциональная схема БУ показана на рис. 2.

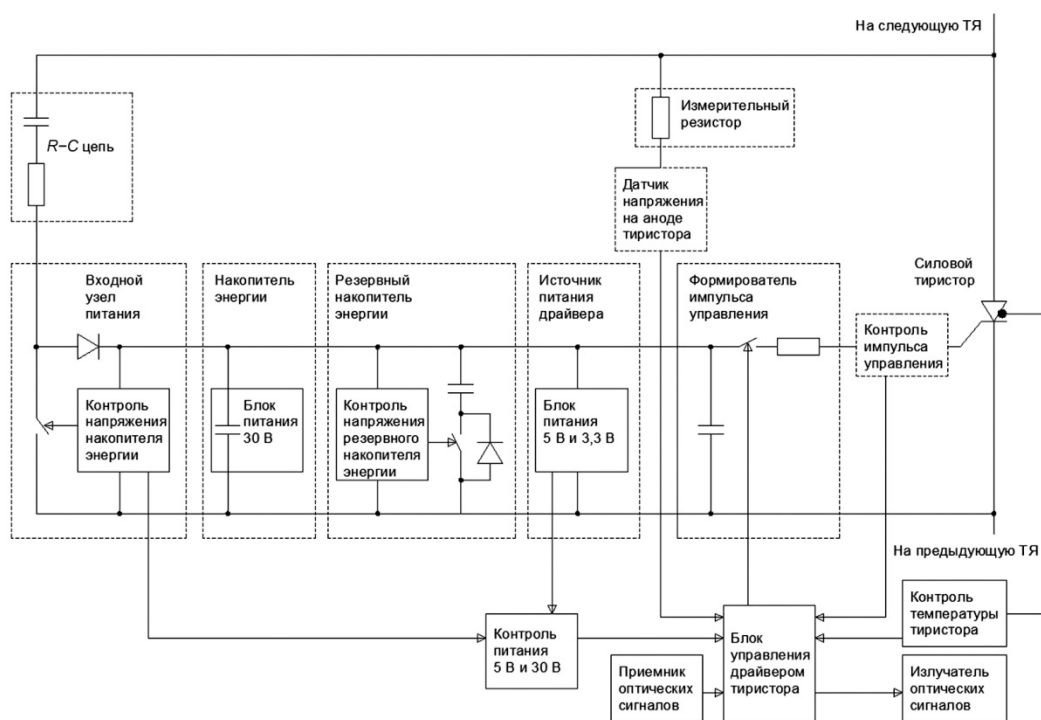


Рис. 2. Функциональная схема БУ

1.4. Схема высоковольтной защиты тиристора

Схема высоковольтной защиты (блок ВЗ) тиристора (рис. 3) действует на отпирание тиристора независимо от БУ. Схема осуществляет защиту тиристора от перенапряжений, а также осуществляет управление тиристором в случае отказа БУ. При внутренних перенапряжениях в вентиле, когда пиковое напряжение на тиристоре превышает 5600 ± 200 В, схема защиты формирует импульс на включение данного тиристора независимо от напряжения на других тиристорах вентиля. Момент формирования защитного импульса определяется моментом возникновения перенапряжения.

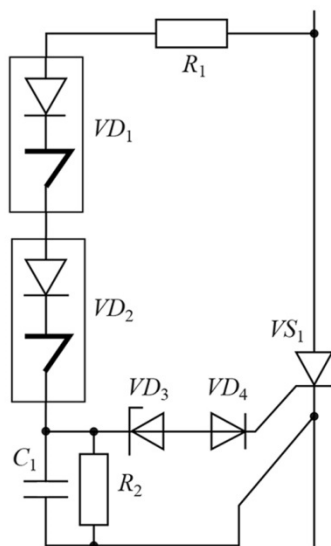


Рис. 3. Схема защитного включения

Работа вентиля с защитным включением тиристоров не ограничена во времени, но должна продолжаться до ближайшего планового отключения.

1.5. Дроссель насыщения

Дроссели насыщения предназначены для ограничения производной тока в тиристорах в момент включения и уменьшения выбросов напряжения в момент выключения. Всего в БВПМ 16 дросселей по 2 на каждом ВТМ.

Дроссель насыщения представляет собой разрезной тороидальный магнитопровод из аморфного сплава на основе железа с обмоткой из алюминиевой трубы. Дроссель имеет водяное охлаждение.

1.6. Шкаф управления

Шкаф управления представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для управления, защиты и сигнализации ВТВ, составляющих блок

вентилей преобразовательного моста. ШУ имеет оптические связи с блоками управления ТЯ ВТВ БВПМ, находящимися на высоком потенциале.

Обмен данными между функциональными модулями ШУ осуществляется защищенным последовательным цифровым кодом, что обеспечивает высокую помехозащищенность системы. Каждый элемент системы осуществляет контроль исправности модулей, с которыми он осуществляет взаимодействие. Резервирование всех элементов и возможность горячей замены любых функциональных модулей ШУ обеспечивает его высокую надёжность.

2. Методы расчёта надёжности

Для анализа и расчёта надёжности автоматизированных систем управления технологическими процессами и силового оборудования преобразовательных подстанций [1–4, 7] используются следующие методики:

- метод логических блок-диаграмм;
- анализ дерева отказов;
- марковский анализ.

Первым шагом в расчётах является получение исходной информации для расчёта интенсивностей отказа, определенных и заданных изготовителем оборудования для каждого элемента, модуля, блока или комплектной подсистемы. Для метода логических блок-диаграмм следующим шагом будет объединение (логическое сложение и умножение) вероятностей отказов отдельных компонентов по каждой выполняемой функции (управления/защиты).

В работах НИИПТ [1], а также в зарубежных исследованиях [2], посвященных анализу расчёту надёжности высоковольтных вентилях, для указанных целей используется метод логических блок-диаграмм.

Логические диаграммы графически отображают взаимосвязь элементов и их влияние на работоспособность системы в целом. Структурно-логическая схема

представляет собой совокупность ранее выделенных элементов, соединённых друг с другом последовательно или параллельно [3].

Последовательным (с точки зрения надёжности) считается соединение, при котором отказ любого элемента приводит к отказу всей системы.

Параллельным (с точки зрения надёжности) считается соединение, при котором отказ любого элемента не приводит к отказу системы, пока не откажут все соединённые элементы.

Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением n элементов:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)), \quad (1)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента; $q_i(t)$ – вероятность отказа i -го элемента.

Соответственно, вероятность отказа такой системы:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)). \quad (2)$$

Если система состоит из равнонадёжных элементов ($p_i = p$), то

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n. \quad (3)$$

Если все элементы системы работают в периоде нормальной эксплуатации и имеет место простейший поток отказов, наработки элементов и системы подчиняются экспоненциальному распределению:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t\right] = \exp(-\lambda_c t), \quad (4)$$

где

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (5)$$

эквивалентная интенсивность отказов системы; λ_i – интенсивность отказов i -го элемента.

Для системы из n равнонадёжных элементов ($\lambda_i = \lambda$).

$$\lambda_c = n\lambda; \quad T_o = \frac{T_{oi}}{n},$$

где T_o – средняя наработка системы до отказа; T_{oi} – средняя наработка до отказа i -го элемента.

Для отказа системы с параллельным соединением элементов в течение наработки t необходимо и достаточно, чтобы все её элементы отказали в течение этой наработки. Так что отказ системы заключается в совместном отказе всех элементов, вероятность чего (при допущении независимости отказов) может быть найдена по теореме умножения вероятностей как произведение вероятностей отказа элементов:

$$Q(t) = q_1(t)q_2(t)\dots q_n(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - p_i(t)). \quad (6)$$

Соответственно, вероятность безотказной работы:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i(t)). \quad (7)$$

Для систем из равнонадёжных элементов ($p_i = p$)

$$Q = q^n; \quad P = 1 - (1 - p)^n. \quad (8)$$

При экспоненциальном распределении наработки выражение (7) для $P(t)$ принимает вид:

$$P(t) = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n, \quad (9)$$

откуда после интегрирования и преобразований средняя наработка системы определяется как:

$$T_o = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{oi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}, \quad (10)$$

где $T_{oi} = 1/\lambda_i$ – средняя наработка элемента до отказа.

Если элементы имеют разные показатели надёжности, то среднее время наработки до отказа определяется путем интегрирования выражения (7):

$$T_o = \int_0^{\infty} 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i(t)) dt = \int_0^{\infty} 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}) dt. \quad (11)$$

Коэффициент готовности системы можно определить из выражения:

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b}, \quad (12)$$

где T_b – среднее время восстановления системы.

2.1. Расчёт надёжности БВПМ с использованием метода логических блок-диаграмм

2.1.1. Схема замещения надёжности БВПМ

Логическая блок-схема надёжности БВПМ, построенная на основании анализа структуры его, приведена на рис. 4. Элемент 1 эквивалентен отказу тиристорных ячеек БВПМ, элемент 2 – эквивалентные отказы дросселей насыщения, элемент 3 – шкафа управления, защиты и сигнализации, элемент 4 – системы охлаждения БВПМ, элемент 5 – возгорания БВПМ, элемент 6 – прочие отказы, приводящие к отключению БВПМ.



Рис. 4. Логическая блок-схема надёжности БВПМ

Логическая блок-схема расчёта надёжности тиристорной ячейки состоит из последовательно соединённых элементов: тиристора (Т), резистора демпфирующей цепи (R_d), конденсатора демпфирующей цепи (C_d), шунтирующего сопротивления ($R_{ш}$), блока управления тиристорной ячейкой (БУ) (рис. 5).



Рис. 5. Логическая блок – схема надёжности тиристорной ячейки

Логическая блок – схема расчёта надёжности БУ-ВЗ составленная на основании анализа структуры БУ и ВЗ, приведена на рис. 6. При составлении схемы учтено, что ВЗ обеспечивает формирование управляющего импульса на тиристоре в случае отсутствия импульса управления на тиристоре по причине отказа БУ и/или при неисправности в канале управления данным БУ.

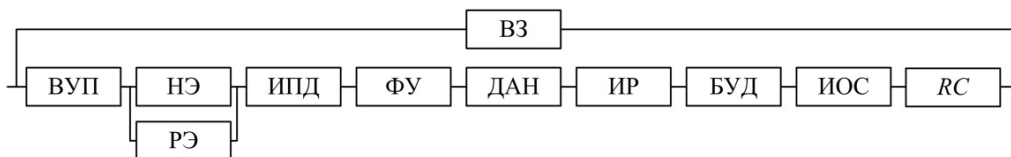


Рис. 6. Логическая блок-схема надёжности БУ-ВЗ

Наименование устройств на рис. 6: ВУП – входной узел питания, НЭ – накопитель энергии, РЭ – резервный накопитель энергии, ИПД – источник питания драйвера, ФУ – формирователь импульса управления, ДАН – датчик анодного напряжения, ИР – измерительный резистор, БУД – блок управления драйвером тиристора, ИОС – излучатель оптических сигналов, RC – RC-цепь.

Логическая блок-схема расчёта надёжности ВЗ, составленная на основании анализа структуры ВЗ, приведена на рис. 7. Обозначения устройств соответствуют элементам схемы рис. 3.

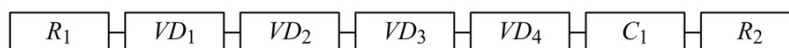


Рис. 7. Логическая блок-схема надёжности ВЗ

Эквивалентную схему замещения тиристорных ячеек можно представить в виде логической блок-схемы (рис. 8) для случая структурного резервирования со скользящим нагруженным резервом [4], где m – минимальное количество ячеек, необходимое по условиям работы тиристорного вентиля, n – количество резервных ячеек. Отказ ТВ наступает при отказе $n + 1$ тиристорных ячеек.

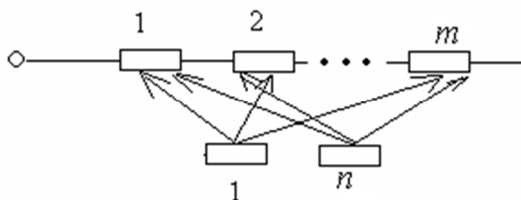


Рис. 8. Логическая блок-схема надёжности тиристорных ячеек ТВ

2.1.2. Характеристики надёжности элементов схемы замещения БВПМ

Характеристики надёжности элементов схемы замещения БВПМ представлены в табл. 1. Данные получены от разработчика БВПМ, из [4, 5], а также из данных об эксплуатации тиристорных вентилях на Выборгской преобразовательной подстанции [1, 6].

Поскольку известно, что все виды неисправностей ШУ могут быть устранены без выведения БВПМ из работы, путем горячей замены неисправных модулей шкафа, ШУ можно считать абсолютно надёжным элементом и не учитывать в схеме надёжности БВПМ.

Таблица 1

Характеристики потока отказов элементов БВПМ

Элемент	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Тиристорная ячейка: элементы силовой части	
Тиристор	0,0087
Резистор демпфирующей цепи, R_d	0,038
Конденсатор демпфирующей цепи, C_d	0,0059
Шунтирующее сопротивление, $R_{ш}$	0,031
Тиристорная ячейка: блок управления тиристорной ячейкой	
ВУП – входной узел питания	0,0372
НЭ – накопитель энергии	0,237
РЭ – резервный накопитель энергии	0,237
ИПД – источник питания драйвера	0,7407
ДАН – датчик анодного напряжения	0,0223
ФИУ – формирователь импульса управления	0,0372
ИР – измерительный резистор	0,038
БУД – блок управления драйвером тиристора	0,0372
ИОС – Излучатель оптических сигналов	0,023
Резистор RC-цепи	0,038
Конденсатор RC-цепи	0,018
Высоковольтная защита	
R_1	0,038
R_2	0,038
VD_3, VD_4	0,0044
C_1	0,018
R_2	0,038
VD_1, VD_2	0,0076
Модульный реактор	0,0022
Система охлаждения:	
Собственно система охлаждения	2,29576
Отказы из-за течи хладагента ТЯ	0,16
Возгорания ВТВ	0,2
Прочие причины	0,7

2.1.3. Расчёт надёжности БВПМ

Сначала произведём расчёт надёжности тиристорного вентиля – части БВПМ от анода (катода) до фазы.

Как было отмечено, для расчёта надёжности тиристорной части ТВ можно воспользоваться соотношениями для резервированной группы со скользящим нагруженным резервом.

Резервированная группа (рис. 8) состоит из m основных однотипных элементов и n резервных, находящихся в нагруженном резерве ($m > n$). При отказе одного из основных элементов на его место в работе включается один из резервных (резервные элементы также могут отказывать). Таких замещений, не нарушающих работу

резервированной группы в целом, может быть не более n . Средняя наработка до отказа такой группы в предположении абсолютно надёжных переключающих устройств и равнонадёжных элементов, каждый из которых имеет интенсивность отказов λ , может быть найдена из выражения [4]:

$$T_{\text{ТЧВ}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ТЯ}}} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m+1} + \dots + \frac{1}{m+n} \right), \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{ТЯ}}$ – эквивалентная интенсивность отказов тиристорной ячейки; $T_{\text{ТЧВ}}$ – средняя наработка до отказа элементов тиристорной части ТВ.

Найдем вероятность безотказной работы такой резервированной группы в течение времени t в предположении, что элементы, входящие в группу, равнонадёжны и имеют одинаковую вероятность безотказной работы $P(t)$ за время t , а переключающие устройства абсолютно надёжны. Безотказная работа группы в течение времени t будет иметь место, если осуществится хотя бы одно из событий A в течение одного и того же времени: A_0 – все элементы исправны; A_1 – один элемент отказал, $n+m-1$ элементов исправны; A_i – i элементов отказали, $n+m-i$ элементов исправны; A_n – n элементов отказали, m элементов исправны.

Число различных вариантов:

$$C_{m+n}^i = \frac{(m+n)!}{i!(m+n-i)!}. \quad (14)$$

Таким образом, событие B – безотказная работа группы в течение времени t определяется из выражения:

$$B = \sum_{i=0}^n C_{m+n}^i A_i. \quad (15)$$

Вероятность события A_i можно подсчитать на основании теоремы умножения вероятностей безотказной работы для независимых событий:

$$P_i(A_i) = [1 - P(t)]^i [P(t)]^{n+m-i}. \quad (16)$$

Вероятность безотказной работы резервированной группы в течение времени t , равную вероятности $P(B)$ наступления события B , определим на основании теоремы сложения вероятностей для несовместных событий:

$$P_p(t) = \sum_{i=0}^n C_{m+n}^i [1 - P(t)]^i [P(t)]^{n+m-i}. \quad (17)$$

Определим эквивалентную интенсивность отказов элементов силовой схемы тиристорной ячейки.

Рассчитаем эквивалентную интенсивность отказов блока БУ-ВЗ. Эквивалентная интенсивность отказов ВЗ равна:

$$\lambda_{\text{ВЗ}} = 2\lambda_{\text{ВД1-2}} + 2\lambda_{\text{ВД3-4}} + \lambda_{\text{R1}} + \lambda_{\text{R2}} + \lambda_{\text{C1}} = 0,156 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Эквивалентная интенсивность отказов элементов основной схемы БУ:

$\lambda_{\text{БУ}} = \lambda_{\text{ВУП}} + \lambda_{\text{ЭНЭ}} + \lambda_{\text{ИПД}} + \lambda_{\text{ДАН}} + \lambda_{\text{ФИУ}} + \lambda_{\text{ИР}} + \lambda_{\text{БУД}} + \lambda_{\text{ИОС}} + \lambda_{\text{R}} + \lambda_{\text{C}} = 1,1496 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$
где $\lambda_{\text{ЭНЭ}}$ – эквивалентная интенсивность отказов накопителей энергии, определяемая по выражению (10) (с учётом того, что интенсивность отказов основного и резервного накопителей энергии принята одинаковой):

$$\lambda_{\text{ЭНЭ}} = \frac{2\lambda_{\text{НЭ}}}{3} = 0,158 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Эквивалентная интенсивность отказов блока БУ-ВЗ определяется по выражению:

$$\lambda_{\text{БУ-ВЗ}} = \frac{1}{T_{\text{БУ-ВЗ}}} = 0,15511 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$$

где $T_{\text{БУ-ВЗ}}$ – среднее время наработки на отказ эквивалентного блока БУ-ВЗ.

$$T_{\text{БУ-ВЗ}} = \left(\frac{1}{\lambda_{\text{БУ}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{ВЗ}}} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_{\text{БУ}} + \lambda_{\text{ВЗ}}} \right).$$

Эквивалентная интенсивность отказов силовых элементов тиристорной ячейки определяется по выражению:

$$\lambda_{\text{СЭТЯ}} = \lambda_{\text{Т}} + \lambda_{\text{Rд}} + \lambda_{\text{Сд}} + \lambda_{\text{Rш}} = 0,0836 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$$

где $\lambda_{\text{Т}}$ – интенсивность отказов тиристора; $\lambda_{\text{Rд}}$ – интенсивность отказов резистора демпфирующей цепи; $\lambda_{\text{Сд}}$ – интенсивность отказов конденсатора демпфирующей цепи; $\lambda_{\text{Rш}}$ – интенсивность отказов шунтирующего сопротивления.

Эквивалентная интенсивность отказов тиристорной ячейки:

$$\lambda_{\text{ТЯ}} = \lambda_{\text{СЭТЯ}} + \lambda_{\text{БУ-ВЗ}} = 0,23711 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Среднюю наработку на отказ тиристорной части ТВ определим по формуле (13), где $m = 42$ – минимальное число рабочих тиристорных ячеек, $n = 6$ – число резервных тиристорных ячеек.

$$T_{\text{ТЧВ}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ТЯ}}} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m+1} + \dots + \frac{1}{m+n} \right) = 657\,345 \text{ ч;}$$

$$\lambda_{\text{ТЧВ}} = \frac{1}{T_{\text{ТЧВ}}} = \frac{1}{657\,345} = 1,52127 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Определим эквивалентную интенсивность отказов тиристорной части БВПМ:

$$\lambda_{\text{ТЧ-БВПМ}} = 2\lambda_{\text{ТЧВ}} = 2 \cdot 1,52127 \cdot 10^{-6} = 3,04254 \text{ 1/ч.}$$

Определим эквивалентную интенсивность отказов системы охлаждения. По данным, представленным разработчиком, вероятность безотказной работы $P_{\text{СО}}$ за наработку $T_{\text{СО}}$ 8 800 ч – не менее 0,98. Тогда эквивалентная интенсивность отказов системы охлаждения определится из выражения:

$$\lambda_{\text{СО}} = \frac{1}{T_{\text{СО}}} \ln \frac{1}{P_{\text{СО}}} = \frac{1}{8800} \ln \frac{1}{0,98} = 2,29576 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Отдельно необходимо учесть отказы, связанные с течью подводящих трубок или фитингов на радиаторах ТЯ (или дросселях насыщения). По данным [6] в настоящее время вынужденные отключения блоков Выборгской преобразовательной подстанции происходит по этой причине. По данным статистики аварийных отказов блоков Выборгской преобразовательной подстанции средняя интенсивность отказов БВПМ по причинам, связанных с течью хладагента, составляет $22,831 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

На БВПМ планируются к применению следующие виды соединений:

Т.1 Соединение штуцер/хомут для присоединения шлангов к коллекторам ВТМ;

- Т.2 Соединение коллекторов МТВ и охладителей ptfe-трубками, фитинги с накидной гайкой;
- Т.3 Быстроразъемное соединение БРС для подключения шлангов к магистральным коллекторам БВПМ (ISO 16028);
- Т.4 Сварка тип труба/муфта и труба/штуцер на полипропиленовых трубах магистральных коллекторов БВПМ и коллекторов ВТМ.

Первые два типа соединения широко применяются изготовителем оборудования БВПМ. Ни на одном из объектов за все время эксплуатации (более 8 лет) не было ни одного случая протечек. Кроме того, необходимо учитывать, что капельная течь на ВТМ новой конструкции не может привести к аварийным отключениям БВПМ. На надёжность будут влиять только нештатные отсоединения подводящих трубок/шлангов от фитингов и разрыв трубок и/или коллекторов. Последнее маловероятно, поскольку по давлению трубопроводы выбраны с кратным запасом, гидроудар в системе невозможен благодаря конструкции СО, все оборудование БВПМ подвергается гидравлическим испытаниям. Быстроразъемное соединение БРС будут применяться в щадящих условиях при рабочем давлении 1 % от номинального, при расходе 10 % от максимального. БРС широко применяются на предприятиях пищевой, химической и тяжелой промышленности, в нефтегазовой отрасли, там где вопрос надёжности всегда стоит остро. Полипропиленовые трубы широко применяются в водоснабжении жилых и иных помещений. Сварные соединения полипропиленовых труб по надёжности идентичны цельным изделиям.

Таким образом, интенсивность отказов нового БВПМ из-за течи хладагента в ТЯ будет значительно ниже, чем у существующего вентильного блока. Основываясь на статистических данных о течах хладагента в вентильных блоках, где применены указанные выше типы соединений, можно установить оценочное значение интенсивности отказов БВПМ из-за течи хладагента на уровне $0,16 \cdot 10^{-6}$ 1/ч (примерно 1 раз в семь лет).

Эквивалентная интенсивность отказов БВПМ:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{БВПМ}} &= \lambda_{\text{ТЧ_БВПМ}} + \lambda_{\text{СО}} + \lambda_{\text{ТХ}} + 16 \cdot \lambda_{\text{МР}} + \lambda_{\text{в}} + \lambda_{\text{ПО}} = \\ &= (3,04254 + 2,29576 + 16 \cdot 0,0022 + 0,2 + 0,7) \cdot 10^{-6} = 6,4335 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,} \end{aligned}$$

где $\lambda_{\text{ТЧ_БВПМ}}$ – интенсивность отказов тиристорной части БВПМ;

$\lambda_{\text{СО}}$ – интенсивность отказов системы охлаждения БВПМ;

$\lambda_{\text{ТХ}}$ – интенсивность отказов БВПМ, связанных с течью подводящих трубок или фитингов на радиаторах ТЯ;

$\lambda_{\text{МР}}$ – интенсивность отказов модульных реакторов;

$\lambda_{\text{в}}$ – интенсивность отказов возгорания БВПМ;

$\lambda_{\text{ПО}}$ – интенсивность отказов прочие отказы, приводящие к отключению БВПМ.

Среднее время наработки до отказа БВПМ составит:

$$T_{\text{БВПМ}} = 1 / \lambda_{\text{БВПМ}} = \frac{1}{6,4335 \cdot 10^{-6}} \text{ 155 436 ч} = 17,7 \text{ лет.}$$

Коэффициент готовности БВПМ определим в соответствии с выражением:

$$K = \frac{T_{\text{БВПМ}}}{T_{\text{БВПМ}} + T_{\text{в_БВПМ}}} = \frac{155436}{155436 + 3,5} = 0,999,$$

где ТВ_БВПМ – среднее время восстановления вентильного блока. В соответствии с техническим заданием на КВПУ, параметр потока отказов, приводящих к аварийному отключению КВПУ, не более 11 1/год.

Логическую блок – схему надёжности КВПУ можно упрощённо представить в виде последовательного соединения 12 БВПМ. Интенсивностями отказов преобразовательных трансформаторов и сглаживающего реактора можно пренебречь ввиду их малых значений.

Эквивалентная интенсивность отказов КВПУ:

$$\lambda_{\text{КВПУ}} = 12 \cdot \lambda_{\text{БВПМ}} = 12 \cdot 6,4335 \cdot 10^{-6} = 77,202 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч или } 0,676 \text{ 1/год.}$$

Полученная величина интенсивности отказов КВПУ с новыми вентилями находится на уровне мировых показателей.

Заключение

1. В большинстве отечественных и зарубежных работ для расчётов показателей надёжности высоковольтных БВПМ используется метод логических блок-диаграмм. С помощью метода логических блок-диаграмм произведен расчёт показателей надёжности проектируемого тиристорного вентиля.

2. Расчётное среднее время наработки до отказа БВПМ составило 17,7 года.

3. К недостаткам старой конструкции блока вентильного преобразовательного моста (БВПМ) относятся: ненадёжные и неремонтопригодные гидравлические соединения между элементами высоковольтного тиристорного модуля (ВТМ); течи в ВТМ приводят к выходу из строя нижестоящих модулей; устаревшая элементная база. В настоящее время большинство отказов вентиляей Выборгской преобразовательной подстанции происходит из-за течей подводящих трубок или фитингов на радиаторах тиристорных ячеек (или дросселях насыщения). Достигнуть значительного улучшения показателей надёжности разрабатываемого БВПМ планируются за счёт применения соединения повышенной надёжности. При этом капельная течь на ВТМ новой конструкции не может привести к аварийным отключениям БВПМ. Все гидравлические соединения на БВПМ разъёмные; из влажной зоны ВТМ (зоны, в которой возможно образование капельных течей деионизованной воды) вынесены все элементы, чувствительные к влаге; конструкция ВТМ обеспечивает защиту нижестоящих модулей от капельных течей. Надёжность вентильной конструкции обеспечивается также резервированием ТЯ, использованием современной элементной базы, а также резервированием всех элементов шкафа управления и возможность горячей замены любых его функциональных модулей. Произведен расчёт эквивалентной интенсивности отказов КВПУ. Эквивалентная интенсивность отказов КВПУ составила 0,676 1/год. Полученная величина интенсивности отказов КВПУ с новыми вентилями находится на уровне мировых показателей.

Список использованных источников

1. Алексеева Н. Д., Плоткина Н. З., Прочан Г. Г., Григорьева М. Ю. Анализ надёжности высоковольтных вентиляей по опыту эксплуатации Выборгской выпрямительно-инверторной подстанции. – Повышение эффективности мощных преобразователей. Сборник научных трудов НИИПТ, 1989. – С. 107–120.
2. Sekine Y., Miki T., Sakurai T., Iwasaki M., Nagasaki O. A method for calculating the reliability of HVDC thyristor valves. *Electrical Engineering in Japan*. Vol. 93, № 6, 1973.

3. Глазунов Л. Л., Грабовецкий В. Л., Щербаков О. В. Основы теории надёжности автоматических систем управления. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
4. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. Учебно-практическое пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.
5. Надёжность электрорадиоизделий. Справочник. – М.: МО РФ, 2004. – 620 с.
6. Анализ аварийных отключений оборудования ВИП в 2015 году и рекомендации по повышению надёжности. Отчет ОАО «НИИПТ», 2016.
7. Сулова О. В., Чекан Г. В. Использование модифицированного топологического метода оценки надёжности технических систем на примере электропередачи Россия – Финляндия, включающей вставку постоянного тока // Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2016. № 1(74). – С. 20–34.

Алексеев Никита Андреевич, ведущий инженер Центра высоковольтной преобразовательной техники Научно-технического центра Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»).

E-mail: alekseev_na@ntc-power.ru

Булыкин Павел Юрьевич, генеральный директор «Айдис групп» (ОАО «Айдис групп»).

E-mail: info@ieds.ru

Змазнов Евгений Юрьевич, канд. техн. наук, заместитель заведующего отделом постоянного тока Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (ОАО «НИИПТ»).

E-mail: zmaz_niip@mail.ru

Карпов Виктор Николаевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторией Центра высоковольтной преобразовательной техники Научно-технического центра Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»).

E-mail: karpov_vn@ntc-power.ru

Лозина Наталья Георгиевна, канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора – научный руководитель, заведующий отделом постоянного тока Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (ОАО «НИИПТ»).

E-mail: loz2000@mail.ru

Матинян Александр Маратович, канд. техн. наук, начальник отдела Центра высоковольтной преобразовательной техники Научно-технического центра Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»).

E-mail: matinyan_am@ntc-power.ru

Пешков Максим Валерьевич, канд. техн. наук, заместитель начальника Центра высоковольтной преобразовательной техники Научно-технического центра Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы (АО «НТЦ ФСК ЕЭС»).

E-mail: peshkov_mv@ntc-power.ru

Сулова Ольга Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заведующий научно-техническим отделом Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (ОАО «НИИПТ»).

E-mail: olga.suslova@bk.ru