

АНАЛИЗ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация. В статье представлены способы и устройства защиты тиристорных преобразователей в том числе и преобразователей электроподвижного состава переменного тока. Дано описание каждого технического решения и принцип его действия, указаны достоинства и недостатки.

Результаты проведенного анализа способов и устройств защиты тиристорных преобразователей, были использованы при разработке способа повышения работоспособности выпрямительно-инверторных преобразователей современного подвижного состава в режиме рекуперативного торможения. В данном способе были учтены положительные качества и исключены недостатки предлагаемых ранее технических решений, направленных на защиту и функциональную диагностику тиристорных преобразователей.

Ключевые слова: защита от аварийных режимов, силовой преобразователь, аварийные процессы, электроподвижной состав.

Roman I. Ustinov, Vyacheslav S. Tomilov, Oleg V. Melnichenko

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF METHODS AND DEVICES FOR PROTECTING THYRISTOR CONVERTERS AC ELECTRIC ROLLING STOCK

Abstract. The article presents methods and devices for protecting thyristor converters, including converters of AC electric rolling stock. The description of each technical solution and the principle of its operation is given, the advantages and disadvantages are indicated.

The results of the analysis of methods and devices for protecting thyristor converters were used in the development of a method for improving the performance of rectifier-inverter converters of modern rolling stock in the regenerative braking mode. In this method, the positive qualities were taken into account and the disadvantages of the previously proposed technical solutions aimed at the protection and functional diagnosis of thyristor converters were excluded.

Keywords: emergency protection, power converter, emergency processes, electric rolling stock.

Введение

Целесообразность применения рекуперативного торможения на электроподвижном составе переменного тока подтверждается богатой полувековой историей. Особенно хорошо просматривается тенденция развития электровозов переменного тока с рекуперативным торможением, которая начинается в 1957 году с момента выпуска опытного электровоза серии ВЛ61 №012 на Новочеркасском электровазостроительном заводе [7]. В настоящее время все электровозы переменного тока с коллекторными тяговыми электродвигателями современных серий грузовые 2(3/4) ЭС5К «Ермак» и пассажирские ЭП1(П/М) имеют рекуперативное торможение [4]. Это позволяет существенно снизить затраты электроэнергии на тягу поездов, обеспечить плавное регулировочное торможение поездом в ручном и автоматическом режимах, а также уменьшить износ колесных пар и тормозных колодок поездов. Для сохранения, преимуществ, которые дает применение рекуперативного торможения, необходима безотказная работа выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) электровозов.

По результатам проведенного патентного поиска, выявлен ряд отечественных способов и устройств, направленных на защиту силовых цепей тиристорных преобразователей от сверхтоков и токов перегрузок.

Устройство защиты тиристорных преобразователей. Предлагаемое техническое решение основано на применении задающего генератора и пересчетного устройства, выполненных в виде двух идентичных каналов для анодной и катодной группы тиристоров и содержащих датчики обратных напряжений тиристоров, схемы формирования импульсов и выходную ячейку «И» [1].

В каждом канале предложенного устройства выходы датчиков и пересчетного устройства через схемы формирования подключены ко входам схемы совпадения, выход которой соединен с потенциальным входом триггера, включенного в данный канал, и со счетным входом триггера, включенного в другой канал. Выходы триггеров подключены ко входам упомянутой ячейки «И» [1]. На рис. 1 представлена структурная схема устройства защиты, где 1 – датчик защиты; 2 –

формирователи импульсов; 3 – логические схемы «И»; 4, 5 – логические схемы «ИЛИ-НЕ», 6-8 – формирователи импульсов пересеченного устройства (ячейки 6 и 7 представляют собой инверторы, а ячейка 8 – собственно формирователь), 9 – логические схемы «Память».

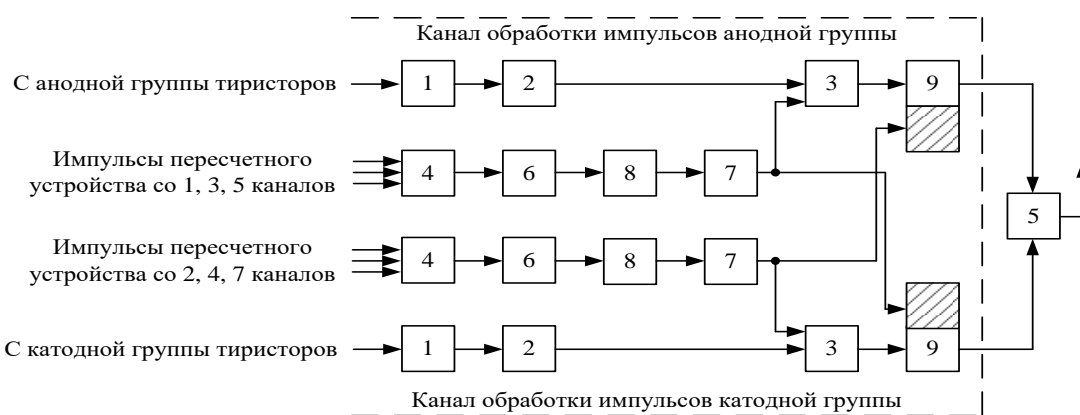


Рис. 1. Структурная схема устройства защиты тиристорного преобразователя электроподвижного состава

Импульсы с датчиков защиты, установленных в катодной и анодной группах тиристор инвертора, образуют две синхронные, сдвинутые на 180 эл. град. последовательности импульсов. Импульсы пересчетного устройства также выделяются в две синхронные, сдвинутые на 180 эл. град. Последовательности из сформированных импульсов, каждая из которых сравнивается по логической схеме «И» с той последовательностью импульсов от датчиков защиты, которая совпадает с ней по времени. Результирующие импульсы с выхода элементов «И» преобразуются триггерами в прямоугольные импульсы с нулевым потенциалом, длительность которых на 120 эл. град. превышает длительность сформированных импульсов последовательностей импульсов пересчетного устройства. Импульсы с выхода триггеров подаются на выходную логическую схему «И».

Импульсы обратного напряжения на тиристорах анодной (катодной) группы подаются на датчик защиты 1, а с выхода датчика – на формирователь 2. Сформированные прямоугольные импульсы с выхода формирователя 2 поступают на первый вход элемента 3. На выходы элемента 4 поступают импульсы пересчетного устройства с 1-го (2-го), 3-го (4-го) и 5-го (6-го) каналов. Просуммированные элементом 4 импульсы пересчетного устройства инвертируются элементом 6 и подаются на вход формирователя 8. Сформированные прямоугольные импульсы длительностью порядка 100 мксек с выхода формирователя 8 поступают на вход элемента 7, с выхода которого импульсы подаются на второй вход элемента 3 и на счетный вход элемента 9. С выхода 3 импульсы поступают на соответствующий потенциальный вход элемента 9 в исходное состояние осуществляется отрицательными импульсами, которые поступают на него счетный вход с элемента 7 канала обработки импульсов катодной группы. Момент возвращения элемента 9 в исходное состояние совпадает с задним фронтом этих импульсов.

При нормальной работе инвертора на выходе элемента 5 имеется нулевой потенциал. В случае исчезновения импульсов с какого-либо датчика защиты, что означает срыв коммутации в инверторе, соответствующий элемент 9 не переключится и на выходе элемента 5 появится отрицательный потенциал, который является сигналом отключения инвертора [1].

Положительным эффектом является быстрое действие системы защиты тиристорного преобразователя. К недостаткам можно отнести, то, что при незначительной задержке коммутации тиристоров одного из плеч инвертора возможно ложное срабатывание устройства защиты, что является не допустимым для применения на электроподвижном составе, особенно при рекуперативном торможении.

Устройство для функционально диагностирования и защиты тиристорного преобразователя. Техническим результатом изобретения является расширение функциональных возможностей путем определения неисправных каналов системы управления, защиты преобразователя от токов перегрузки и короткого замыкания в нагрузке, а также исключения ложного срабатывания защиты при одновременной коммутации двух тиристоров [2]. На рис. 2 представлено устройство

для функционально диагностирования и защиты тиристорного преобразователя. Устройство содержит: датчики тока 1-8, тиристоры 9-16; 17-20 элементы развязки; элемент «Запрет» 22; триггеры 21, 23, 27, 29; элемент «И» 24, 26, 28; элемент «Задержки» 25.

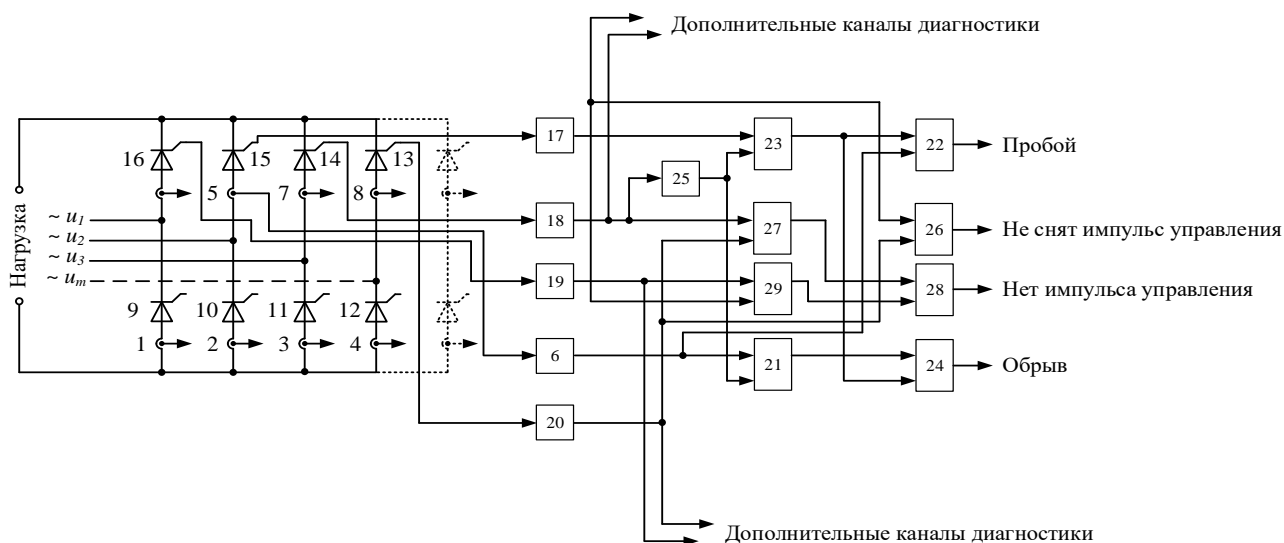


Рис. 2. Устройство для функционально диагностирования и защиты тиристорного преобразователя электровоза

Применение элемента «Задержки» 25 позволяет осуществлять защиту от токов перегрузки и короткого замыкания в нагрузке, так как с ростом нагрузки увеличивается угол коммутации тиристоров (продолжительность их одновременной проводимости) вследствие наличия индуктивного сопротивления обмоток тягового трансформатора. Время задержки рассчитывается по формуле

$$t = \frac{\gamma}{\omega}, \quad (1.1)$$

$$\gamma = \arccos\left(\cos \alpha - \frac{2I_d X_{\phi}}{E_{ЛТ}}\right) - \alpha, \quad (1.2)$$

где γ – угол коммутации тиристоров;
 α – угол управления открытием тиристоров;
 I_d – значение тока нагрузки;
 $E_{ЛТ}$ – амплитудное значение напряжения питающего трансформатора;
 X_{ϕ} – индуктивное сопротивление обмоток трансформатора;
 ω – круговая частота питающего напряжения.

При превышении I_d больше допустимого значения (при перегрузке и коротком замыкании в нагрузке) сработает защита и отключит преобразователь, ибо время коммутации превысит время выдержки элемента «Задержки» 25. При этом на инверторном входе элемента «Запрет» 22 логический ноль появиться раньше, чем на прямом входе, так как второй триггер 23 установится в нулевое состояние раньше, чем на прямом входе появиться нулевой сигнал от закончившего работу датчика тока 6. В результате сработает защита [2].

Наличие четырех выходов с каждого канала устройства позволяет путем выведения их на блок индикации определить характер и место неисправности отключения этих же сигналов. При перегрузке и коротком замыкании в нагрузке сигнал произойдет по каналу «Пробой» (рис. 2).

Недостатками данного устройства являются: схемотехническая сложность системы, трудность расположения его на электровозе, после срабатывания защиты для определения вида неисправности – пробой тиристора или перегрузка (короткое замыкание в нагрузке) необходимо произвести повторное включение преобразователя и обратить внимание на изменение

индикации, это подвергнет очередному воздействию силы тока на силовую цепь преобразователя, многократно превышающую рабочие значения. В случае применения данного решения на электровозе в режиме рекуперативного торможения, срабатывании защиты приведет к потере тормозного эффекта.

Устройство защиты полупроводникового преобразователя. Техническим результатом полезной модели является защита от возникновения короткозамкнутых контуров в полупроводниковом преобразователе посредством слежения за моментом выдачи импульсов управления на управляющие электроды полупроводниковых ключей [5].

На рис. 3 представлена структурная схема предлагаемого устройства защиты полупроводникового преобразователя. Предлагаемое устройство защиты содержит датчик напряжения (ДН) 1, датчик тока (ДТ) 2, выходы которых подключены к микроконтроллеру (М) 3, в котором содержится блок прерывания по напряжению (INT_U) 4 и блок прерывания по току (INT_I) 5, каждый из которых подключен к таймеру фазы по цепи напряжения (T_U) 6 и таймеру фазы по цепи тока (T_I) 7 соответственно, выходы которых подсоединены к блоку сравнения (К) 8, подключенному к блоку разрешения выдачи импульса управления полупроводниковых ключей (ENB) 9.

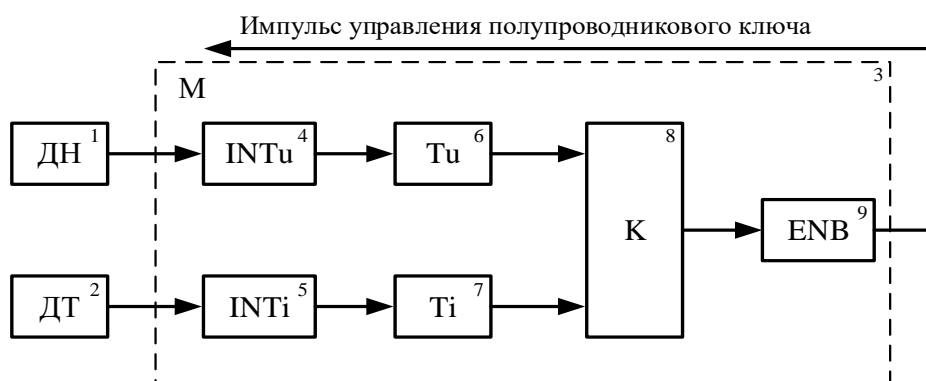


Рис. 3. Структурная схема предлагаемого устройства защиты полупроводникового преобразователя электровоза

Устройство защиты работает следующим образом. С датчика напряжения 1 подается сигнал в блок прерывания по напряжению 4 микроконтроллера 3, где определяется момент перехода напряжения нагрузки преобразователя через ноль напряжения, тем самым провоцируется создание одного события, равное такту микроконтроллера, в нашем случае это фаза напряжения нагрузки, и начинает отсчитываться фаза напряжения нагрузки в таймере фазы по цепи напряжения 6, осуществляя тем самым счет событий, определяющих фазу напряжения нагрузки

$$\phi_{n+1} = \phi_n + \Delta, \quad (1.3)$$

где ϕ_{n+1} – значение фазы напряжения нагрузки на последующем такте работы микроконтроллера;

ϕ_n – значение фазы напряжения нагрузки на предыдущем такте работы микроконтроллера;

Δ – время работы одного такта микроконтроллера.

С датчика тока 2 поступает сигнал в блок прерывания по току 5, где определяется переход тока нагрузки через ноль тока, тем самым провоцируется создание одного события, равное такту микроконтроллера, в нашем случае это фаза импульса управления, и начинает отсчитываться фаза импульса управления между нулем тока нагрузки преобразователя и началом импульса управления полупроводникового ключа в таймере фазы по цепи тока 7, осуществляя тем самым счет событий, определяющих фазу импульса управления по формуле

$$t_{\text{фиУ}(n+1)} = \phi_{n+1} + t_{\text{фиУ}(n)} + \Delta, \quad (1.4)$$

где $t_{\text{фиУ}(n+1)}$ – значение фазы импульса управления на последующем такте работы микроконтроллера;

$t_{\text{фиУ}(n)}$ – значение фазы импульса управления на предыдущем такте работы микроконтроллера.

Значения фазы напряжения нагрузки и фазы импульса управления сравниваются в компараторе 8, и результат обрабатывается в блоке разрешения выдачи импульсов 9. Если $t_{\text{фиУ}(n+1)} - \phi_{n+1} = 0$, то выставляется запрет на выдачу импульсов управления полупроводниковых ключей в этот момент времени и $t_{\text{фиУ}(n+1)}$ принимает значение уставки $\phi_{n+1} + \text{const}$, если $t_{\text{фиУ}(n+1)} - \phi_{n+1} \geq \text{const}_2$, то выдается разрешение на выдачу импульсов управления, const – постоянная времени, задаваемая оператором микроконтроллера; const_2 – минимальное значение постоянной времени, задаваемой оператором микроконтроллера [5].

Недостатком является то, что, это устройство защиты срабатывает одновременно в случае аварийного режима, блокируя сигналы управления тиристоров, в следствие чего рабочий режим преобразователя не восстанавливается.

Заключение

Проведенный анализ показал, что значительная часть технических решений, направленных на защиту и диагностику тиристорных преобразователей основана на установке дополнительных элементов и оборудования в конструкцию электровоза или преобразователя. Это влечет за собой удорожание и усложнение систем управления тяговым приводом, в некоторых случаях снижает его работоспособность. На сегодняшний день, разработан «Способ повышения работоспособности выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения» [6], основанный на доработке программного обеспечения микропроцессорной системы управления тяговым приводом электровоза переменного тока. За счет анализа сигналов (датчиков угла коммутации u_γ , и датчиков тока i_a) используемых для штатной работы ВИП, определяются пропуски импульсов управления и тиристорные плечи, не принявшие токовую нагрузку. После выявления отказавшего тиристорного плеча, импульсы управления формируются и подаются таким образом, что это плечо резервируется другим – параллельным плечом этого же преобразователя и происходит сохранение режима рекуперативного торможения, тем самым повышается работоспособность ВИП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов А.М., Подобедов Е.Г., Рябов В.Н. Устройство защиты тиристорного преобразователя. Патент SU, no. 384174: МПК, H02H 7/10, H02H 1/18, 1973.
2. Колодеев И.Д., Красноперов В.Ф., Ковтун А.Н. Устройство для функционального диагностирования и защиты тиристорного преобразователя. Патент SU, no. 1690072: МПК, H02H 7/12, 1988.
3. Матвеев Д.А., Байков Д.В. Способ защиты и диагностики последовательно соединенных тиристоров и устройство для его осуществления. Патент RU, no. 2535290: МПК, H02H 7/10, H02H 7/12, H02M 1/34 2014.
4. Руководство по эксплуатации. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) Ермак. ИДМБ.661142.009РЭ. – 2006.
5. Удовиченко А.В. Устройство защиты полупроводникового преобразователя. Патент RU, no. 171204: МПК, H02H 7/10, 2016.
6. Устинов Р.И., Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Шрамко С.Г., Линьков А.О., Яговкин Д.А. Способ повышения работоспособности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения и устройство для его реализации. Патент RU, no. 2659756: МПК B60L 9/12, B60L 7/16, H02P 7/295, H02M 7/1555, B60L 2200/26, 2018.
7. Электрическая тяга на рубеже веков/ред. А. Л. Лисицын. М.: Интекст, 2000. – 248 с.

REFERENCES

1. Abramov A.M., Podobedov E.G., Ryabov V.N. Ustrojstvo zashchity tiristorного преобразователя. Patent USSR, no. 384174, 1973.
2. Kolodeev I.D., Krasnoperov V.F., Kovtun A.N. Ustrojstvo dlya funkcional'nogo diagnostirovaniya i zashchity tiristorного преобразователя. Patent USSR, no. 1690072, 1988.
3. Matveev D.A., Bajkov D.V. Sposob zashchity i diagnostiki posledovatel'no soedinennyh tiristorov i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya. Patent USSR, no. 2535290, 2014.
4. Электровоз магистрал'ный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации (User manual. The mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K)), Novocherkassk, 2007. – volume 1, 635 p., volume 2, 640 p.
5. Udovichenko A.V. Ustrojstvo zashchity poluprovodnikovogo преобразователя. Patent USSR, no. 171204, 2016.
6. Sposob povysheniya rabotosposobnosti elektrovozov peremennogo toka v rezhime rekuperativnogo tormozheniya i ustrojstvo dlya ego realizacii [Method for alternating current electric locomotive work capacity increase during regenerative braking mode and device for its realization]. Patent RU2659756.

Информация об авторах

Устинов Роман Иванович – ассистент кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: romust93@mail.ru

Томилов Вячеслав Станиславович – аспирант кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: slavatomilov22@gmail.com

Мельниченко Олег Валерьевич – д.т.н., заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmelnval@mail.ru

Author

Roman I. Ustinov – assistant of the department of electric rolling stock, Irkutsk state University of railway transport, Irkutsk, e-mail: romust93@mail.ru

Oleg V. Melnichenko – doctor of technical Sciences, head of the Department of "Electric rolling stock", Irkutsk state University of railway transport, Irkutsk, e-mail: olegmelnval@mail.ru

Vyacheslav S. Tomilov – post-graduate student of the Department of electric rolling stock, Irkutsk state University of railway transport, Irkutsk, e-mail: slavatomilov22@gmail.com

Для цитирования

Устинов Р.И. / Анализ способов и устройств защиты тиристорных преобразователей электроподвижного состава переменного тока [Электронный ресурс] / Р.И. Устинов, О.В. Мельниченко, В.С. Томилов // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2020.

For citation

Ustinov R.I. / Analysis of methods and devices for protecting thyristor converters ac electric rolling stock [Electronic resource] / R.I. Ustinov, O. V. Melnichenko, V.S. Tomilov // Young science of Siberia: electron. scientific journal – 2020.