

УДК 621.332:621.316.5

DOI 10.46960/2658-6754_2023_3_125

АПВ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ИСПОЛНЕНИЯ ПОСТА СЕКЦИОНИРОВАНИЯ

И.П. Карпов

ORCID: **0000-0001-9520-7546** e-mail: **ech2_karpovip@grw.ru**

Филиал ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению
Дорожная электротехническая лаборатория
Нижний Новгород, Россия

Автоматическое повторное включение (АПВ) выключателей питающих линий контактной сети является основным элементом автоматизации электроснабжения электроподвижного состава железной дороги и обеспечивает восстановление питания потребителей без участия человека. В большинстве случаев время АПВ находится в интервале 4-7 с и выполняется независимо от состояния тяговой сети в послеаварийном режиме, т.е. без контроля короткого замыкания (КЗ). При таком виде АПВ возможны включения на большой ток КЗ, что может приводить к дальнейшему развитию повреждения. На основе большого практического опыта разработки, исследований, внедрения и эксплуатационной проверки устройств контроля КЗ на Горьковской железной дороге предложены новые варианты АПВ. Рассматриваются варианты адаптивного АПВ (с контролем КЗ) на участках с постами секционирования на выключателях и разъединителях. Предложен алгоритм АПВ, учитывающий функцию контроля КЗ и формулы для расчета времени АПВ с учетом различных влияющих факторов.

Ключевые слова: автоматическое повторное включение, контроль короткого замыкания, переменный ток, пост секционирования, система тягового электроснабжения.

Для цитирования: Карпов И.П. АПВ в системе тягового электроснабжения переменного тока при различных вариантах исполнения поста секционирования // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 125-132.
DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_125

AUTOMATIC RECLOSING IN AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM WITH VARIOS VERSIONS OF SECTIONING POST

I.P. Karpov

ORCID: **0000-0001-9520-7546** e-mail: **ech2_karpovip@grw.ru**

Branch of JSC «Russian Railways» Transenergo Gorky directorate for energy supply
Railway electrotechnical laboratory
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Automatic reclosure (AR) of contact network supply line switches is the main element of automation of power supply of railway electric rolling stock and ensures restoration of power to consumers without human. In most cases, the AR time is in the range of 4-7 s and is performed regardless of the state of the traction network in post-emergency mode, i.e. without short circuit monitoring. This type of AR makes it possible to switch on a high short circuit current, which can lead to further damage propagation. The article proposes new options for AR, which were obtained using extensive practical experience in the development, research, implementation and operational testing of short-circuit monitoring devices on the Gorky Railway. Options for adaptive AR (with short-circuit monitoring) were considered in areas with sectioning posts on switches and disconnectors. A new AR algorithm is proposed that takes into account the short circuit control function and equations for AR time calculating taking into account various influencing factors.

Keywords: alternating current, automatic reclosing, sectioning post, short circuit monitoring, traction power supply system.

For citation: I.P. Karpov, "Automatic reclosing in AC traction power supply system with various versions of sectioning post", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 125-132, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_125

I. Введение

На отечественных электрифицированных железных дорогах применяются три варианта исполнения постов секционирования (ПС) двухпутного участка контактной сети переменного тока.

1. ПС на выключателях с индивидуальными защитами (рис. 1, а) является типовым [1]. При КЗ отключается четверть зоны (QA1 и QAB1), далее, при успешном автоматическом повторном включении (АПВ) выключателя питающей линии на тяговой подстанции (QA1) электроснабжение полностью восстанавливается. Выключатель на ПС (QAB1) включает энергодиспетчер, при неуспешном АПВ энергодиспетчер действует по регламенту.

2. ПС на выключателях с групповой потенциальной защитой (рис. 1, б): на данный вариант работы переводят ПС, оснащенные масляными выключателями при внедрении безлюдной технологии обслуживания, поскольку объем профилактических работ в этом случае гораздо меньше (выключатель ПС не отключает токи КЗ). При КЗ отключается вся зона (QA1, QA2 и QB1, QB2), в бестоковую паузу выключатели ПС отключаются от действия защиты минимального напряжения. После АПВ выключателей питающих линий энергодиспетчер включает выключатели ПС и восстанавливает нормальное электроснабжение, при неуспешном АПВ он действует согласно регламенту (выделяет зону с повреждением).

3. ПС на разъединителях (рис. 1, в) применяется на Горьковской и некоторых других железных дорогах [2]. В последние годы такие проекты ПС развиваются и модернизируются [3], по принципу действия является аналогом варианта ПС на выключателях с групповой потенциальной защитой.

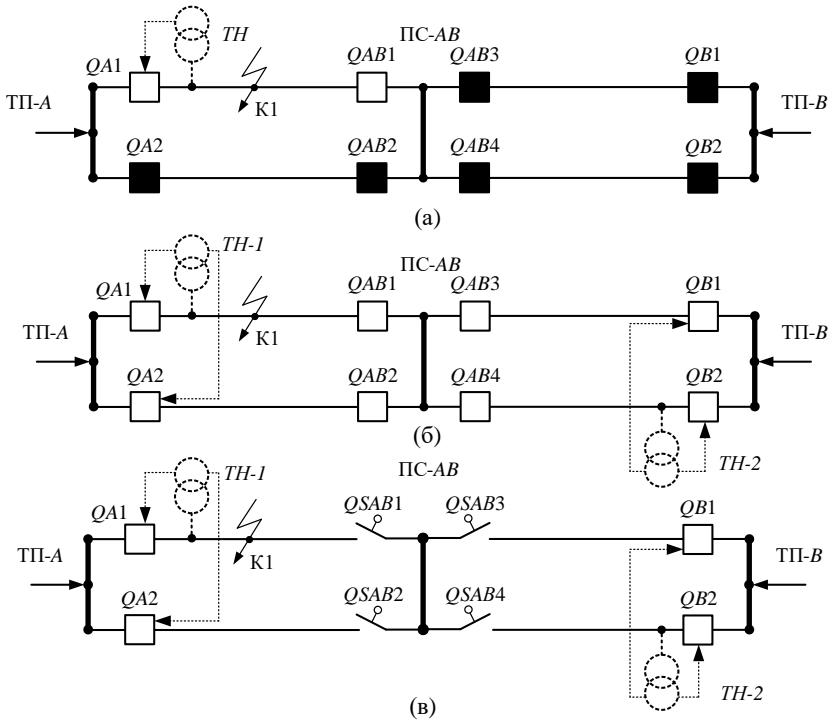


Рис. 1. Варианты исполнения ПС:
на выключателях с индивидуальными защитами (а); на выключателях с групповой потенциальной защитой (б); на разъединителях (в)

Fig. 1. Sectioning posts options:
on switches with individual protections (a); on switches with group potential protection (b); on disconnectors (v)

Каждый вариант имеет свои достоинства и недостатки, рассмотрение которых не входит в задачи настоящей работы, цель которой – анализ времени АПВ и автоматики в целом.

Согласно действующим нормативным документам [4], время АПВ составляет порядка 4-7 с и выбирается независимо от состояния тяговой сети в послеаварийном режиме, т.е. применяется т.н. «слепое» АПВ. В данном случае возможны (и регулярно случаются) повторные включения с током КЗ [5], которые могут приводить к дальнейшему развитию повреждения, например к пережогу контактного провода или несущего троса, что недопустимо.

В то же время в течение последних 10-15 лет на полигоне Горьковской железной дороги успешно внедрены методы [6, 7] определения устойчивых коротких замыканий, основанные на анализе остаточного и наведенного напряжения в отключенной контактной сети. Очевидно, что необходимо рассмотреть возможность внедрения адаптивного АПВ, время которого будет зависеть от многих факторов. Расчет уставок времени подобного АПВ будет представлен ниже.

II. Время АПВ

Выдержка времени АПВ по нормативным документам:

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{КЗ}} + t_{\text{ЗАП}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{КЗ}}$ – наибольшая длительность устойчивого короткого замыкания, возникающего при заезде электроподвижного состава (ЭПС) с поднятым токоприемником на заземленную секцию контактной сети (например, при проходе изолирующего сопряжения), диапазон значений от 3,0 до 5,0 с; $t_{\text{ЗАП}}$ – время запаса, значение принимается 2,0 с.

Гарантировать отсутствие устойчивого КЗ можно только путем контроля остаточного или наведенного напряжения в обесточенной контактной сети после аварийного отключения выключателя, что и применяется на Горьковской железной дороге. Источником остаточного и наведенного напряжения является электроподвижной состав. После аварийного отключения электровозы прежних серий (например, ВЛ-80С) генерируют напряжение от асинхронной машины – фазорасщепителя, современные электровозы (например, 2ЭС5К, 3ЭС5К) от асинхронных вспомогательных машин собственных нужд [8, 9]. Для этих целей устанавливается дополнительный трансформатор напряжения, подключенный непосредственно к контактной сети, управляющий АПВ своего и смежного выключателя питающей линии контактной сети (пунктир на рис.1 а, б, в). В этом случае применяется АПВ с контролем КЗ, и время повторного включения можно рассчитать иначе. Для варианта 1 (рис. 1, а), время АПВ будет зависеть от оснащенности выключателя отдельным ТН.

При наличии ТН и отсутствии устойчивого КЗ время АПВ необходимо обеспечить сохранение схемы диодного ЭПС старого образца (ВЛ80С) [10] в исходном состоянии:

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{ЭПС}} - t_{\text{ОТС}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{ЭПС}}$ – время, в течении которого не разбирается силовая схема диодных ЭПС (согласно [11] 0,5-0,7 с); $t_{\text{ОТС}}$ – время отстройки, принять 0,1-0,2 с.

Отметим, что при обращении ЭПС нового образца с выпрямительно-инверторным преобразователем (ВИП) даже при кратковременном исчезно-

вении напряжения в контактной сети (0,2-0,3 с) система управления тиристорами теряет синхронизацию с сетью [8], в итоге – такое время АПВ не имеет смысла. Для сохранения тягового режима ЭПС при кратковременных исчезновениях напряжения в контактной сети необходима модернизация схем электровоза. Поэтому при преимущественном обращении ЭПС с ВИП время АПВ может быть выбрано согласно действующим нормативным документам, используя (1).

При наличии устойчивого КЗ АПВ должно быть запрещено. В случае отсутствия контроля устойчивого КЗ, время АПВ выбирается согласно действующим нормативным документам. Для варианта 2 и 3 (рис. 1, б, в) нужно вводить две уставки АПВ, в зависимости от наличия или отсутствия устойчивого КЗ. При отсутствии устойчивого КЗ, для удобства эксплуатации и уменьшения времени на восстановление нормальной схемы электроснабжения, ПС не должен отключаться в бестоковую паузу, тогда:

$$t_{\text{АПВ1}} = t_{\text{ЗМН}} - \Delta t, \quad (3)$$

где $t_{\text{ЗМН}}$ – выдержка времени групповой потенциальной защиты; Δt – ступень отстройки:

$$\Delta t = t_U + t_{\text{СОБСТ}} + t_{\text{ЗАП}}, \quad (4)$$

где t_U – время на анализ напряжения в отключенной контактной сети. Согласно [11] контроль устойчивого КЗ длится до 1 с, принимается $t_U = 1$ с; $t_{\text{СОБСТ}}$ – собственное время на включение выключателя и время работы устройств автоматики, принимается $t_{\text{СОБСТ}} = 0,1$ с; $t_{\text{ЗАП}} = 0,5$ с.

При наличии устойчивого КЗ время АПВ нужно обеспечить отключение ПС, чтобы АПВ трех выключателей (QA2, QB1, QB2 на рис. 1, б, в) из четырех было успешным. Для варианта 2 (ПС на выключателях, рис. 1, б):

$$t_{\text{АПВ2}} = t_{\text{ЗМН}} + \Delta t_2, \quad (5)$$

где Δt_2 – ступень отстройки для ПС на выключателях (с групповой защитой), принимается $\Delta t_2 = 1$ с.

Для варианта 3 (ПС на разъединителях, рис. 1, в):

$$t_{\text{АПВ2}} = t_{\text{ЗМН}} + \Delta t_3, \quad (6)$$

где Δt_3 – ступень отстройки для ПС на разъединителях, принять $\Delta t_3 = 2$ с, поскольку собственное время отключения разъединителя с моторным приводом может достигать 1,5-2 с.

При отсутствии контроля остаточного и наведенного напряжения, ПС должен отключаться в бестоковую паузу, тогда:

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{ЗМН}} + \Delta t_{2/3}, \quad (7)$$

где $\Delta t_{2/3}$ – для варианта 2 выбирается $\Delta t_2 = 1$ с, для варианта 3 выбирается $\Delta t_3 = 2$ с.

Для варианта 1 АПВ с контролем КЗ возможно при установке отдельного ТН на каждом выключателе обеих смежных тяговых подстанций (QA1, QA2 и QB1, QB2 на рис. 1, а).

Для вариантов 2 и 3 АПВ с контролем КЗ возможно при установке отдельного ТН на обеих смежных тяговых подстанциях хотя бы на одном выключателе (ТН-1 и ТН-2 на рис. 1, б, в), с воздействием на автоматику смежного присоединения (QA2 и QB1).

Все возможные варианты уставки времени АПВ сведены в табл. 1.

Таблица 1.
Время АПВ при различных вариантах исполнения ПС

Table 1.
AR time for different options of substations

Вариант исполнения ПС	Контроль устойчивого КЗ		
	Есть		Нет
	Наличие устойчивого КЗ		
	Да	Нет	$t_{АПВ}$
$t_{АПВ}$	$t_{АПВ}$		
1. ПС на выключателях с индивидуальными защитами	запрет	$t_{АПВ} = t_{ЭПС} - t_{отс}$ или $t_{АПВ} = t_{кз} + t_{зап}$	$t_{АПВ} = t_{кз} + t_{зап}$
2. ПС на выключателях с групповой защитой	$t_{АПВ2} = t_{ЗМН} + \Delta t_2$ или запрет	$t_{АПВ1} = t_{ЗМН} - \Delta t$	$t_{АПВ} = t_{ЗМН} + \Delta t_2$
3. ПС на разъединителях (с групповой защитой)	$t_{АПВ2} = t_{ЗМН} + \Delta t_3$ или запрет	$t_{АПВ1} = t_{ЗМН} - \Delta t$	$t_{АПВ} = t_{ЗМН} + \Delta t_3$

III. Выводы

Рассмотрена автоматика работы системы тягового электроснабжения переменного тока в послеаварийный период при различных вариантах исполнения постов секционирования. Продемонстрирована необходимость перехода от «слепого» АПВ к АПВ с контролем КЗ, при котором возможны как запрет, так и разрешение повторного включения.

Показана необходимость изменения подхода к выбору времени АПВ при наличии функции контроля короткого замыкания. Предложен новый гибкий алгоритм АПВ, основанный на диагностике состояния отключенной тяговой сети, при котором время АПВ зависит от типа поста секционирования на межподстанционной зоне, от типа обращаемого ЭПС. Предложены формулы для расчета времени АПВ.

Поступила в редакцию 06.04.2023

Принята к публикации 19.04.2023

Received 06.04.2023

Accepted 19.04.2023

Библиографический список

- [1] СП 224.132600.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. – 86 с.
- [2] Марквардт К.Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. II. М.: «Транспорт», 1980. – 392 с.
- [3] Куркин С.В., Плаксин В.А. Организация защиты участков с постом секционирования на разъединителях и выключателем в шине // *Наукосфера*. 2022. №8(1). С. 226-229.
- [4] СТО РЖД 07.021.2-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения. М.: ООО «Техинформ», 2019. – 304 с.
- [5] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2009. – 591с.
- [6] Герман Л.А., Попов А.Ю., Саморуков А.В., Ишкин Д.В., Якунин Д.В., Субханвердиев К.С. Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях // *Вестник ВНИИЖТ*. 2017. Т. 76. № 5. С. 266-272.
DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272
- [7] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П. Способ управления автоматическим повторным включением выключателя подстанции контактной сети переменного тока двухпутного участка, Пат. 2744492 RU, заявл. 28.07.20; опубл. 10.03.21. – Бюл. № 7.
- [8] Малютин А.Ю. Применение маловентильных преобразователей в системе питания вспомогательных цепей электровозов переменного тока: автореф. дис. канд. техн. наук, МГУПС (МИИТ), Москва, 2017. – 24 с
- [9] Малютин А.Ю. Состояние вопроса о вспомогательных машинах отечественных электровозов переменного тока // *Электроника и Электрооборудование Транспорта*. 2016. № 6. С. 24-28.
- [10] Руководство по эксплуатации. Электровоз ВЛ80С. М.: Транспорт, 1982. – 622 с.
- [11] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2022. – 264 с.

References

- [1] Traction power supply of the railway, SP 224.132600.2014, Jan. 2014.
- [2] K.G. Markvardt, *Spravochnik po Elektrosnabzheniyu Zheleznykh Dorog [Handbook of Railway Power Supply]*. Vol. 2. Moscow: Transport, 1980 (in Russian).
- [3] S.V. Kurkin and V.A. Plaksin, “Organization of protection of sections with a sectioning post on disconnectors and a switch in the bus”, *Naukosfera*, no. 8(1), pp. 226-229, 2022.

- [4] Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 2. Methodology for selecting action algorithms, blocking settings and automation time delays in a traction power supply system, STO RZD 07.021.2-2015, 2019.
- [5] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita [Relay protection]*. Part 2. Moscow: FSBE APE «EICRT», 2009 (in Russian).
- [6] L.A. German, A.Yu. Popov, A.V. Samorukov, D.V. Ishkin, D.V. Yakunin and K.S. Subkhanverdiev, “A new algorithm for automating power supply of an ac traction network with a sectioning points on switches”, *Russian Railway Science Journal*, vol. 76, no. 5, pp. 266-272, 2017. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272
- [7] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and I.P. Karpov, “*Sposob upravleniya avtomaticheskim povtornym vklyucheniem vyklyuchatelya podstancii kontaktnoj seti peremennogo toka dvuhputnogo uchastka [The method of controlling the automatic reclosing of the switch of the substation of the AC contact network of the double-track section]*”, Patent RU 2744492, Mar. 10, 2021 (in Russian).
- [8] A.Yu. Malyutin, “*Primenenie malovoltnykh preobrazovateley v sisteme pitaniya vspotogatel'nykh tsepey elektrovozov peremennogo toka [The use of low-voltage converters in the power supply system of auxiliary circuits of AC electric locomotives]*”, Cand. of Tech. S. thesis, МИТ, Moscow, Russia, 2017 (in Russian).
- [9] A.Yu. Malyutin, “*Situation with auxiliary motors on russian alternating current electric locomotives*”, *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, no. 6, pp. 24-28, 2016.
- [10] *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Elektrovoz VL80S. [Operation manual. Electric locomotive VL80S]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [11] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizaciya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka [Automation of power supply of AC traction network]*. Moscow: FGBU DPO “Educational Center for Education in Railway Transport”, 2022 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Карпов Иван Петрович, старший электромеханик Дорожной электротехнической лаборатории Горьковской ДЭО Трансэнерго ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Ivan P. Karpov, senior electrical engineer of the Railway electrotechnical laboratory of the Gorky Directorate for Energy Supply – a structural subdivision of Transenergo – a branch of the JSCo «RZD», Nizhny Novgorod, Russian Federation