

Инновационное решение компании «Плутон» для распределения постоянного тока – бездуговой сверхбыстродействующий выключатель AFB

Коммутация постоянного тока в тяговых сетях электрического транспорта, как правило, соединена с тяжёлыми режимами для тяговых сетей и коммутирующих аппаратов. Оперативные отключения в тяговой сети с токами номинальными и выше номинальных, а тем более, защитные отключения аварийных токов – непростые процессы, которые вследствие термического и электродинамического (при кратких замыканиях) воздействия на сети и аппараты могут повлечь за собой как повреждение тяговой сети, так и выход из строя коммутирующего аппарата.

Отключение аварийных токов, как правило, сопровождается горением дуги, образованием плазмы с выделением большого количества энергии, газов. Технология оперативных отключений и отключений аварийных токов, возникших в тяговых сетях, сталкивается с противоречивыми требованиями. Например, логично предположить, что чем быстрее коммутирующий аппарат отключит аварийную цепь, тем меньше повреждений случится в этой цепи (отгорание контактного провода, разрушение опорной изоляции, возгорание, пробой диодов в выпрямителе, заваривание контакта в коммутационном аппарате и пр.). Однако слишком быстрое отключение аварийных токов способствует возникновению высокого уровня перенапряжений в контактной сети. Таким образом, быстро отключать – хорошо, но не без отрицательных последствий для электрической изоляции кабелей аппаратов, включённых в сеть.

Определенные сложности испытывают разработчики коммутационных аппаратов постоянного тока

In this article AFB high-speed no-arc switch developed by Pluto company for electric transport and subways is described. This is a highly intelligent innovative product that brings DC switching technology to a fundamentally new level of reliability, durability, economic efficiency and environmental friendliness.

при отключении малых токов. Ввиду низкого уровня магнитного дутья, присущего при отключении малых токов, время горения дуги увеличивается, возрастает вероятность заваривания контакта. В этом режиме к контактному проводу прикладывается длительное тепловое воздействие, следствием которого является провисание и отгорание контактного провода.

Износ главных контактов – основной фактор, сокращающий жизненный цикл коммутирующих аппаратов. Разработчики прибегают к различным конструктивным и технологическим ухищрениям для того, чтобы продлить жизнь главного контакта (используют вспомогательные дугогасительные контакты, экспериментируют со сплавами серебра и других металлов, увеличивают площадь контактного соединения в паре подвижного и неподвижного контакта, усложняют и удороажают дугогасительные камеры для более эффективного гашения дуги и уменьшения влияния дуги на главный контакт).

Сложность коммутации постоянного тока в сравнении с коммутацией переменного тока заключается в том, что при отключении переменного тока ток в возникающей электрической дуге проходит через «ноль», тем самым облегчая дугогашение на уровне физических процессов. При коммутации постоянного тока ток в электрической дуге через «ноль» не проходит, и физические процессы не помогают прервать ток, а значит, погасить дугу. Облегчает прерывание дуги дугогасительная камера, разбивая большую дугу на ряд маленьких дуг, которые легче гаснут.

Безусловно, в вопросах коммутации разработчики электрических аппаратов добились определённых успехов. Значительно выросли величины отключаемых токов, динамические характеристики выключателей, сократилось время отключения при относительно небольших перенапряжениях, возникающих в процессе коммутации. Достигнутое быстродействие выключателей постоянного тока – полное время

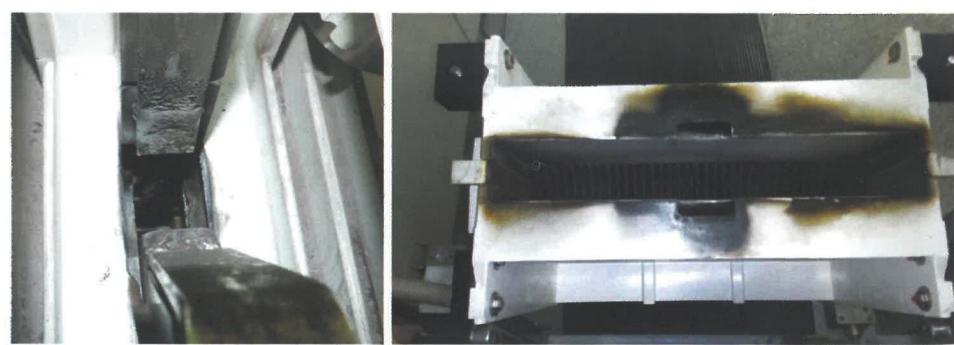


Рис. 1 Состояние контакта (слева) и дугогасительной камеры (справа) выключателя с традиционной коммутацией после аварийного отключения сверхтоков

отключения в диапазоне 20–50 мс, а отключаемые токи – до 180 кА.

И все же, не достигнут высокий уровень надёжности, безопасности, экологической безопасности и экономической эффективности эксплуатации быстродействующих выключателей постоянного тока, который присущ вакуумным выключателям переменного тока. Не достигнуто главное: при эксплуатации выключателей постоянного тока у эксплуатационного персонала нет уверенности в том, что во время очередного процесса коммутации выключатель не выйдет из строя по причине выхода из строя главного контакта. Также, нет уверенности в том, что состояние главного контакта после серии отключений (серии от единиц до нескольких десятков коммутаций) позволит осуществлять дальнейшую эксплуатацию выключателя.

Дугогасительная камера также требует периодического осмотра и обслуживания, чтобы избежать аварийного перекрытия. Регламент осмотров, периодического обслуживания и ремонтов выключателей присутствует, и этот факт свидетельствует о неудовлетворительной надёжности, а также удороажает процесс эксплуатации выключателей постоянного тока в период жизненного цикла. Оставляет желать лучшего и экологическая безопасность при эксплуатации быстродействующих выключателей постоянного тока. По сути, в постоянном токе технология коммутации не менялась с 50-х годов минувшего столетия и обладает всеми недостатками и особенностями, описанными выше.

А тем временем в технологии коммутации переменного тока все проблемные вопросы давно решены. Коммутация происходит в вакууме (или в инертном газе), персонал не осматривает контакты, плазма в распределительных устройствах отсутствует, отсутствует газовыделение. Нет никаких дугогасительных камер и никакого обслуживания контактов.

Инженеры компании «Плутон» решили вступить в спор с законами физики и устраниТЬ несправедливость, которая, казалось, вечно будет сопровождать быстродействующие

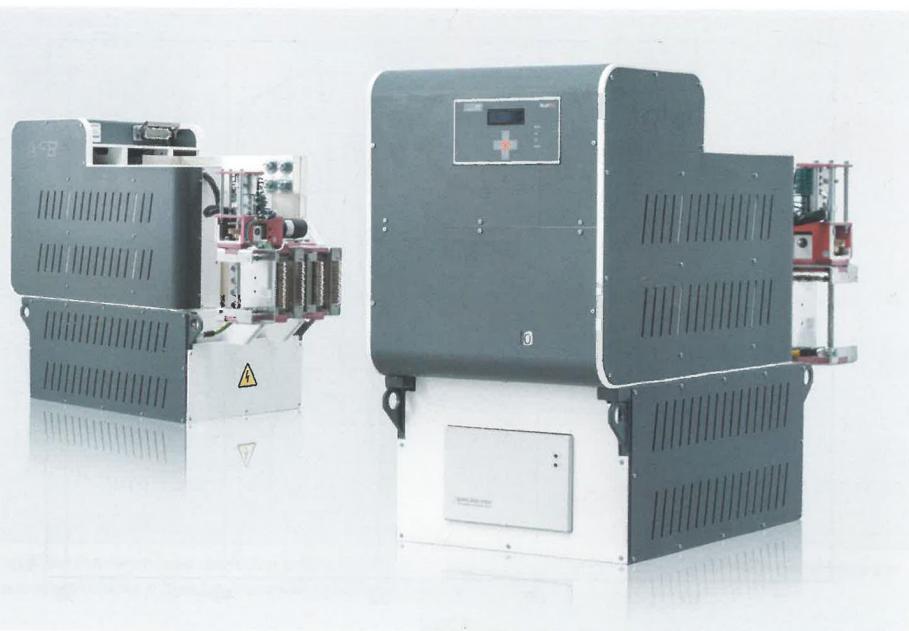


Рис.2 Бездуговой сверхбыстродействующий выключатель AFB

выключатели постоянного тока. Был разработан быстродействующий выключатель AFB (Arc-free circuit breaker) – свободный от дуги бездуговой выключатель с коммутацией постоянного тока в вакуумной камере, лишенный недостатков выключателей постоянного тока с традиционной коммутацией, и наоборот, обладающий преимуществами вакуумных выключателей (рис. 2).

Изначально нашими инженерами была поставлена задача создать выключатель с максимальным быстродействием (собственное время отключения – менее 1 мс) при минимальном уровне выбрасываемых в контактную сеть перенапряжений (не более 2 кВ для выключателя с номинальным током 2500 А), выключатель сверхнадёжный, не требующий периодического обслуживания и ремонтов, с длительным жизненным циклом (не менее 25 лет), без вредного воздействия на окружающую среду.

Быстродействие. Быстродействующими считают выключатели, собственное время отключения которых не превышает 5 мс. Полное время отключения отличается от собственного времени отключения дополнительным временем горения дуги, то есть полное время отключения (или время отключения) состоит из суммы собственного времени отключения и времени горения дуги. Очевидно, что чем меньше величина времени

отключения, тем более низкая амплитуда и установившееся значение тока короткого замыкания возникнет в аварийной цепи при одной и той же скорости нарастания тока di/dt .

Выключатель с традиционной коммутацией при собственном времени отключения 4,3 мс (при $di/dt = 3 \times 106$ А/с) обеспечивает полное время отключения в зависимости от параметров сети в диапазоне 20–50 мс. При этом амплитуда токов короткого замыкания достигает значений от 10 до 100 кА и выше в зависимости от тех же параметров сети. Безусловно, речь идёт об усреднённых величинах. Собственное время отключения описываемого быстродействующего выключателя AFB составляет менее 1 мс, а полное время отключения – менее 4 мс. Соответственно, при расчётной величине тока короткого замыкания в цепи 100 кА, на практике ток успевает нарастить до 4–25 кА. Такое высокое быстродействие достигнуто тем, что у выключателя AFB, главный контакт которого работает в вакууме, практически отсутствует процесс образования дуги, механически контакты разводятся за время менее 1 мс. При этом, ввиду отсутствия дуги, ток через главный контакт прерывается почти в то же мгновение.

Таким образом, выключатель AFB обеспечивает высокоскоростное размыкание силовых контактов и высокоскоростное прерывание ава-

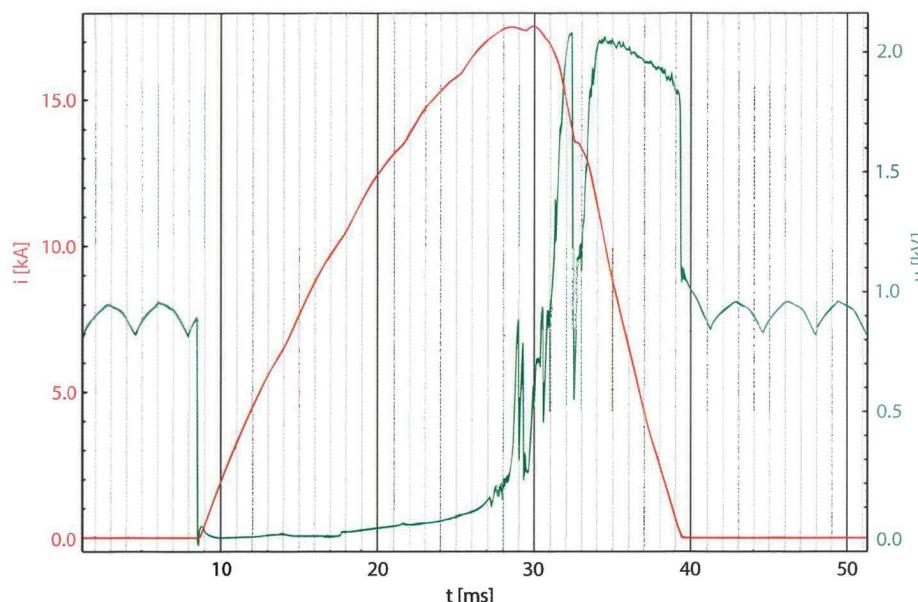


Рис. 3а Осциллограмма отключения аварийного процесса выключателя с традиционной коммутацией (гашение дуги в дугогасительной камере)

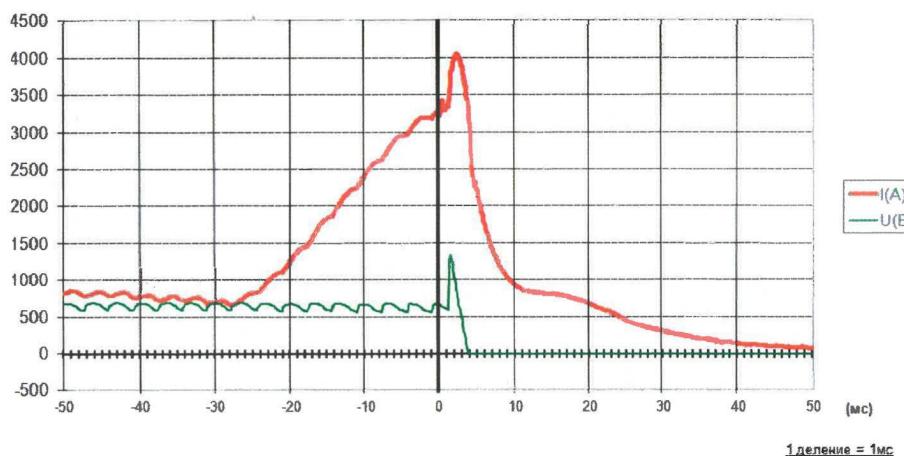


Рис. 3б Осциллограмма отключения аварийного процесса бездугового выключателя AFB

рийного тока. Кроме того, выключатель AFB способен определять возникновение аварийного процесса по скорости нарастания тока di/dt и отключает аварийную цепь прежде, чем ток достигнет величины уставки срабатывания МТЗ (максимальной токовой защиты). Выключатель оборудован специальными цепями, предназначенными для снижения уровня перенапряжений, неизбежно возникающих при столь быстрых отключениях. Благодаря таким уникальным характеристикам быстродействия мы называем выключатель AFB сверхбыстро действующим.

Учитывая то, что выключатель AFB является двунаправленным, главный контакт отключает цепь в вакууме в отсутствие дуги, время отключения не зависит от скоро-

сти нарастания тока di/dt – никаких сложностей с отключением малых токов не возникает.

Инновации и преимущества:

- основная инновация выключателя AFB – работа главного контакта в вакууме. Для гашения тока кратковременного замыкания в противофазе току главной цепи коммутируется ток от предварительно заряженного высоковольтного конденсатора, в результате чего эти токи взаимовызываются. Таким образом, процесс размыкания главного контакта происходит с величиной тока, близкой к нулю, благодаря чему при отключениях любых по величине токов дуга отсутствует;
- встроенная система контроля линии на наличие устойчивого короткого замыкания;
- время отключения выключателя не зависит от скорости нарастания тока di/dt ;
- в выключателе AFB отсутствуют дугогасительные контакты, что исключает необходимость их периодической замены;
- главный контакт находится в вакуумной камере и не изнашивается, что в свою очередь исключает необходимость его осмотров, обслуживания и замены вплоть до окончания механического ресурса вакуумной камеры при неограниченном количестве циклов коммутации без ограничения величин токов короткого замыкания;
- выключатель AFB отличается повышенной механической/электрической износостойкостью вакуумной камеры (50000 коммутаций), что во многом определяет жизненный цикл

ЭКОНОМИЯ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА В 2 РАЗА

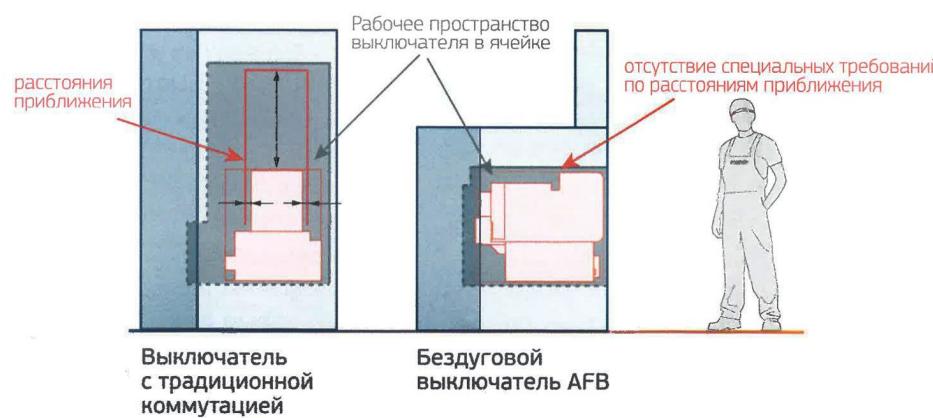


Рис. 4 Уменьшение рабочего пространства выключателя AFB в распределительном устройстве в сравнении с выключателем с традиционной коммутацией

выключателя – не менее 25 лет без необходимости периодической замены механических и электрических узлов;

- в ячейке распределительного устройства постоянного тока выключатель AFB не требует дополнительного пространства для безопасного выброса плазмы (ввиду отсутствия дуги) в сравнении с выключателем с традиционной коммутацией. В результате объём рабочего пространства ячейки сокращается в два раза (рис. 4);

- в ячейке распредустройства постоянного тока с выключателем AFB отсутствует избыточное давление при защитной коммутации, так как отсутствует процесс возникновения плазмы.

Отсутствие разрушительного действия дуги существенно снижает опасность возникновения пожара. Благодаря отсутствию выделения загрязняющих и токсичных продуктов горения, а также отсутствию отложения продуктов горения на элементах выключателя и на конструктивах распредустройств, обеспечивается экологическая чистота и безопасность эксплуатации выключателя (рис. 5).

Компоненты и структура бездугового выключателя AFB

Основные компоненты и узлы выключателя:

1. вакуумная камера, отличающаяся высокой коммутационной стойкостью;

2. блок высоковольтных конденсаторов отключения и гашения с источником питания для работы системы отключения и гашения;

3. электродинамический привод включения/отключения;

4. двухполюсный разъединитель для присоединения к электрической системе шин РУ и для обеспечения видимого гальванического разрыва выключателя. Разъединитель не требует обслуживания, а также отличается высокой динамической устойчивостью и большим механическим ресурсом;

5. элементы защиты от перенапряжений;

6. микропроцессорная система управления и внутреннего монито-



Рис. 5 Экологическая чистота и безопасность эксплуатации выключателя AFB в сравнении с выключателем с традиционной коммутацией

ринга с точной и гибкой настройкой параметров, обеспечивающая функционирование выключателя согласно алгоритмам и непрерывный мониторинг состояния основных узлов;

7. система контроля линии на наличие короткого замыкания;

8. модули тиристоров коммутации привода и гашения с компонентами управления тиристорами.

Работа (включение, отключение, аварийное отключение, установка срабатывания) бездугового быстродействующего выключателя AFB

В выключателе AFB используется микропроцессорная система управления и внутреннего мониторинга, которая конструктивно состоит из трёх модулей: процессорного модуля (рис. 8), измерительного модуля и модуля управления тиристорами.

Данная система осуществляет полноценное самодостаточное управление выключателем и его частями, и выполняет все необходимые функции, включая защитные (максимальную токовую защиту и защиту по скорости нарастания тока di/dt), а также функции телеуправления и телеизмерений через изолированный интерфейс RS-485, протокол Modbus RTU.

Перед включением выключателя система управления проводит ряд проверок, среди которых: контроль напряжения собственных нужд, контроль напряжений высоковольтных конденсаторов отключения и гашения, контроль исправности тиристоров гашения и шунтирующих диодов. Включение можно осуществлять как с предварительной проверкой линии на короткое замыкание, так и без неё.

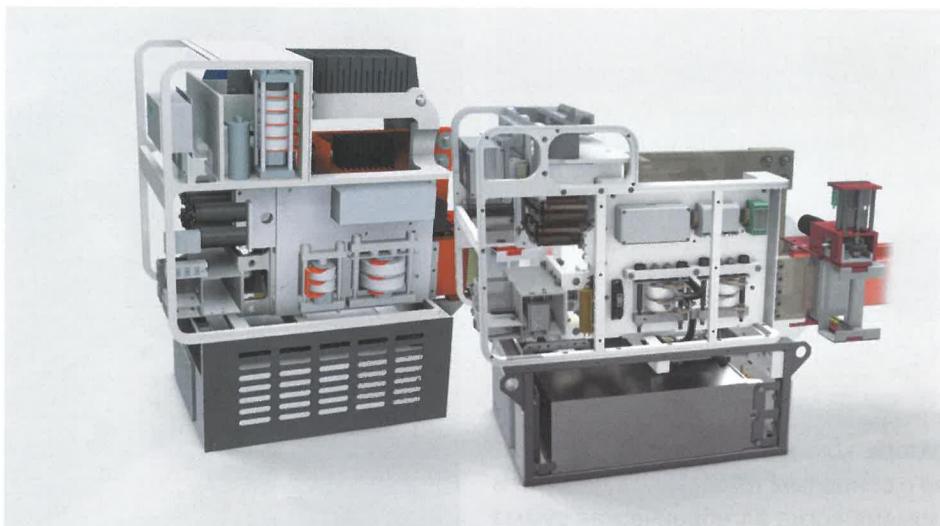
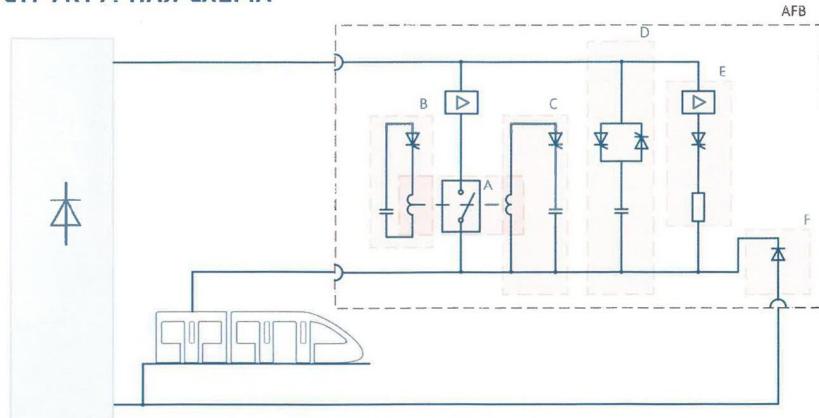


Рис. 6 Конструкция выключателей AFB40 и AFB25

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА



A. Коммутирующая вакуумная камера с системой управления включением и размыканием главного контакта.

B. Катушка управления включения главного контакта приводится в действие посредством коммутации через **тиристор** на предварительно заряженный **конденсатор**.

C. Катушка управления выключения главного контакта рассчитана на рабочее напряжение **1000 V** и приводится в действие посредством коммутации через **тиристор** на предварительно заряженный **конденсатор**. Контроль заряда конденсатора постоянно выполняется системой управления.

D. Главный коммутирующий конденсатор рассчитан на рабочее напряжение **1000 V** и приводится в действие посредством коммутации через **силовые тиристоры**. Контроль заряда конденсатора постоянно выполняется системой управления.

E. Встроенный блок испытания линии на устойчивое короткое замыкание. Испытание линии на устойчивое короткое замыкание проводится опционально и может проводиться перед каждым включением выключателя.

F. Предусмотрен обратный диод для шунтирования токов отключения в прямом направлении через цепь нагрузки.

Рис. 7 Структурная схема выключателя AFB

Включение. Батарея предварительно заряженных низковольтных конденсаторов обеспечивает включение выключателя посредством воздействия на включающую катушку с помощью тиристора включения.

Оперативное отключение. По команде отключения система управления выключателем воздействует на тиристор отключения. При открытии тиристора энергия, накопленная в высоковольтном конденсаторе отключения, коммутируется на включающую катушку. Магнитное поле отключающей катушки запускает механизм отключения, который приводит в движение подвижный контакт вакуумной камеры, вследствие чего силовые контакты вакуумной камеры размыкаются. В момент начала размыкания контактов между ними начинает загораться дуга, которая гасится энергией, запасённой в предварительно заряженном высоковольтном конденсаторе. Ток разряда конденсатора коммутируется в противофазе с основным током силовой цепи. В момент, когда алгебраическая сумма токов равна нулю, дуга гаснет, после

чего контакты расходятся, отключая силовую цепь (рис. 9).

Аварийное отключение. Аварийное отключение происходит по такому же принципу, что и оперативное. В данном случае сигналом для отключения служат измерения, полученные от датчика тока, установленного в главной силовой цепи выключателя, и обработанные по определённым ал-

горитмам микроконтроллером системы управления AFB.

Уставки срабатывания. В выключателе AFB возможно оперативное изменение следующих уставок срабатывания, которые конфигурируются в микропроцессорной системе управления:

- 1) величина тока отсечки в положительном и отрицательном направлениях;

- 2) величина скорости нарастания тока (di/dt) в прямом и обратном направлении, позволяющая предугадывать возникновение аварийного процесса на раннем этапе его развития;

- 3) уставка срабатывания ИКЗ (тест линии), контролирующая ток утечки защищаемого оборудования и контактной сети при отключённом состоянии выключателя AFB, после превышения которой осуществляется запрет на включение автоматического выключателя.

Выключатель AFB разработан и изготовлен в соответствии с требованиями международных и европейских стандартов EN 50123-2/IEC 61992-2, EN 50123-3, IEC 60947-3.

На базе бездугового быстродействующего выключателя AFB инженеры компании «Плутон» разработали принципиально новую концепцию распределительного устройства (рис. 10), отличающуюся компактными размерами, минимальным техническим обслуживанием, надёжностью работы и безопасностью эксплуатации и обслуживания. Впер-



Рис. 8 Процессорный модуль системы управления и внутреннего мониторинга выключателя AFB

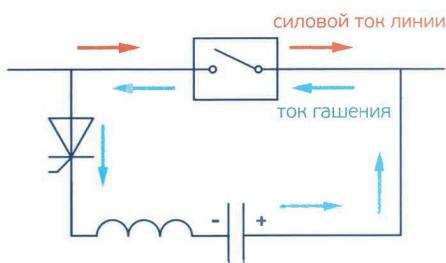
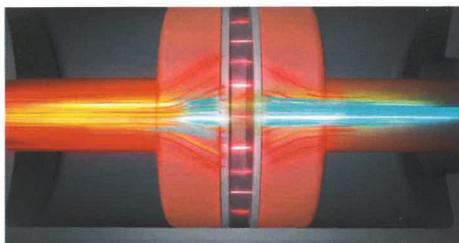


Рис. 9 Принцип действия выключателя AFB

вые данное решение компания «Плутон» продемонстрировала на выставке InnoTrans 2018 в Берлине.

Заключение

Быстродействующий бездуговой выключатель AFB – это высокотехнологичный инновационный продукт, который выводит технологию коммутации постоянного тока на принципиально новый уровень надёжности, долговечности, экономической эффективности и экологической чистоты. Аппарат призван не только максимально упростить эксплуатацию быстродействующих выключателей, но и с высокой эффективностью защитить тяговые сети, не позволяя развиваться токам короткого замыкания до критических величин, влекущих за собой повреждение контактной сети и оборудования подстанций и подвижного состава, включённых в тяговые сети.

Эксплуатирующие компании по достоинству оценят предложенное инновационное решение для реконструкций и нового строительства тяговых подстанций городского электрического транспорта, метрополитенов и ведомственного транспорта промышленных предприятий.

**Овсянicker Д.Е.,
Стрункин Г.Н.,
Шмаровоз С.В.,
Стинишевский Д.С.,
Михневич М.И.**
Сотрудники ЧАО «Плутон»
Тел. +7 495 201-0606.

Основные технические характеристики автоматического выключателя AFB

Наименование параметра	Значение	
	AFB 25	AFB 40
Напряжение		
Номинальное напряжение UNe, V DC	1000	
Номинальное напряжение изоляции UNm, V DC	1200	
Номинальное предельное импульсное напряжение UNi, V DC	8000	
Максимальное допустимое коммутационное перенапряжение Зона В по EN 50124.2 (< 20 мс), V DC	2500	6000
Ток		
Номинальный тепловой ток Ith, Ithe, A DC	2500	4000
Номинальный рабочий ток INe, A DC	2500	4000
Класс нагрузки INcw по IEC 60146-1-1	VI	
Ток короткого замыкания		
Номинальный ток короткого замыкания INss, kA	80	
Номинальный ток короткого замыкания, предельное значение Iss, kA	100	
Амплитуда тока отключения Id, kA	<25	
Максимальное значение скорости нарастания тока, kA/ms	20	
Время		
Собственное время отключения, мс	< 1	
Полное время отключения, мс	< 4	
Диапазон уставок срабатывания тока отключения		
Диапазон уставок срабатывания в прямом направлении, A	500–7500	800–12000
Диапазон уставок срабатывания в обратном направлении, A	500–3750	800–7500
Массогабаритные показатели		
Масса выключателя, кг	215	280
Габариты выключателя (мм) Ширина x Высота x Глубина (Длина)	470x810x955	470x940x955
Дополнительная информация		
Механическая/электрическая износостойкость вакуумной камеры, коммутаций	50 000	
Степень защиты	IP 00	
Напряжение питания собственных нужд, V AC/DC	220, 110, 60	
Напряжение питания цепей управления, V DC	24	



Рис. 10 Новая концепция распределительных устройств постоянного тока с выключателем AFB