



Прорыв в интеграции

Создание компанией АББ гибкого и компактного автоматического выключателя постоянного тока SACE Emax DC

Джованни Фрассинети

Электропроводка является уязвимым местом многих установок. Чтобы ввести в действие проводку новой установки, нужно затратить время и деньги, и еще больше времени и денег, чтобы проверить и обследовать ее. Кроме того, все разнообразные подключаемые устройства занимают место – а его на многих предприятиях остро не хватает, – и каждому из них необходим источник питания. Решение вопроса дает интеграция, то есть объединение в едином серийно выпускаемом оборудовании как можно большего коли-

чества выполняемых функций. В области автоматических выключателей компания АББ достигла невиданного до сих пор уровня интеграции.

Со своим автоматическим выключателем SACE Emax DC компания АББ успешно интегрировала широкий набор функций контроля, защиты и управления в изделие, которое прежде полагалось на внешние устройства. В результате на рынке имеется серия самых современных и высококачественных автоматических выключателей

постоянного тока с воздушной изоляцией. Это выключатели, которые могут служить в качестве эталонных изделий для приложений постоянного тока любого типа.

В данной статье журнал АББ Ревю рассматривает некоторые проблемы, с которыми разработчики столкнулись при осуществлении этого проекта, и более подробно останавливается на некоторых технических аспектах использованных при этом технологий.

Область применения автоматических выключателей постоянного тока входят приложения, «критичные к питанию», то есть объекты, где непрерывность энергоснабжения имеет основополагающее значение. Сюда относятся больницы, промышленные предприятия с непрерывным производственным процессом, системы обеспечения безопасности, телекоммуникационные и вычислительные центры. Это приложения, где жизненно важна немедленная доступность резервного источника энергии. В данной области в качестве высоконадежного и быстродействующего источника могут использоваться аккумуляторные батареи.

Другие примеры приложений постоянного тока – это электрическая тяга и бурение, электролитические процессы в химической промышленности, а также морские приложения (двигатели на батареях или топливных элементах).

Автоматические выключатели в этих приложениях должны защищать как источник питания, так и нагрузку. Выключатель SACE Emax DC компании АББ, с которым знакомит эта статья, не только отлично подходит для таких задач, обеспечивая завершённое и полностью интегрированное решение для приложений постоянного тока, но также является уникальным: ни одно другое изделие на рынке не предлагает таких характеристик (см. вставку).

Приложения

Современные приложения автоматических выключателей постоянного тока можно разделить на два типа, в соответствии с источником сигнала для прерывания тока:

- автоматические выключатели, срабатывающие от встроенного электромеханического устройства;
- выключатели-разъединители, приводимые в действие извне.

Автоматические выключатели со встроенными электромеханическими расцепителями применяются в наиболее простых случаях, когда аппарат питается от защищаемой линии. Такие автоматические выключатели обеспечивают только мгновенную защиту от короткого замыкания. У них нет никаких других функций: стандартной или усовершенствованной защиты, измерения, связи, автоматизации, диагностики или взаимодействия с человеком.

Выключатель-разъединитель, используемый в комбинации с внешним электронным расцепителем, может предложить целый ряд стандартных защитных функций (главным образом, защиту от перегрузки и селективную/мгновенную защиту от короткого замыкания), но он не способен удовлетворить другим очень важным требованиям. Поскольку это решение не является интегрированным, потребитель должен установить в распределительном щите блок расцепителя и датчики тока. Это значит, что распределительный щит не будет таким компактным, как в случае автоматического выключателя.

Более того, необходимость смонтировать, подсоединить и проверить внешний блок расцепителя подразумевает дополнительные затраты на про-

ектирование и монтаж (тестирование и сертификация таких систем – обязанность изготовителя щита или системного интегратора). Вдобавок к этому, нужно предусмотреть вспомогательный источник питания для расцепителя и исполнительного устройства.

Автоматические выключатели в приложениях постоянного тока должны защищать как источник питания, так и нагрузку.

Еще один недостаток варианта со срабатыванием от внешнего сигнала состоит в том,

что максимальная отключающая способность такого выключателя определяется номинальным кратковременно выдерживаемым током выключателя-разъединителя. Эта величина обычно ниже, чем отключающая способность тока к. з. автоматического выключателя за счет меньшей задержки у интегрированного устройства.

Серия выключателей SACE Emax DC (рис. 1) компании АББ является новаторским продуктом, включающим в себя все преимущества интегрированного решения и, кроме того, дополненным несколькими интересными и важными характеристиками.

Этот факт делает SACE Emax DC эталонным изделием на рынке для всех видов приложений постоянного тока. Такой успех был достигнут благодаря новаторской переработке существующих изделий для получения новых решений.

Архитектура изделия

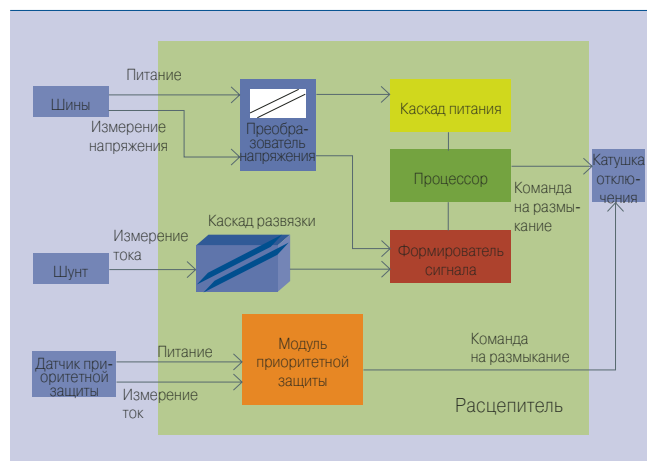
Интегрированные автоматические выключатели переменного тока присутствуют на рынке в течение многих лет. Однако заимствованные из них методы нельзя непосредственно перенести на аппарат для постоянного тока. Целый ряд аспектов придется в корне переработать.

Системная архитектура этого нового автоматического выключателя постоянного тока (рис. 2) включает в себя:

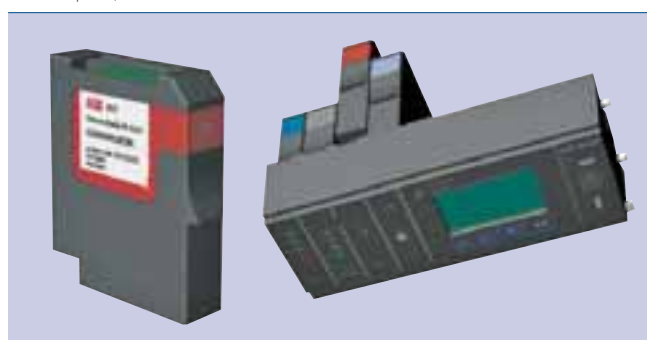
1 Панель управления автоматического выключателя SACE Emax DC компании АББ



2 Структурная схема автоматического выключателя



3 Блок расцепителя



Инновации в изделиях

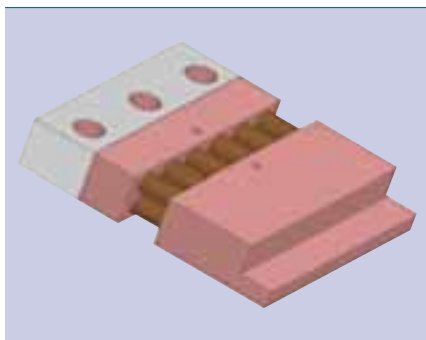
- шунт для измерения тока и обеспечения защиты;
- приоритетный датчик для мгновенной резервной защиты;
- блок электронного расцепителя;
- исполнительный элемент для размыкания выключателя (катушка отключения).

Для расцепителя использована та же архитектура, которую имеет существующая серия Emax AC. Аппаратная часть была модернизирована, чтобы удовлетворить более высоким требованиям к развязке для устройства постоянного тока и пониженным требованиям к обработке сигнала. Программное обеспечение было модифицировано для измерения постоянного тока (среднего значения вместо среднеквадратичного) и для того, чтобы адаптировать алгоритмы защиты к новому методу измерения.

Собственно расцепитель (рис. 3) оснащен опциональными модулями для реализации дополнительных функций, например:

- модуль связи – обеспечивает гальванически развязанный интерфейс с управляющей системой;

4 Шунт, применяемый в автоматическом выключателе для измерения тока



- модуль сигнализации – оснащен дискретными выходами для управления внешними приборами, также может быть включен как входной модуль.

Питание на электронный расцепитель подается от главной цепи автоматического выключателя через интегрированный преобразователь напряжения, интегрированный модуль приоритетной защиты или от внешнего источника питания с гальванической развязкой (24 В пост. тока). Преобразователь напряжения также обеспечивает измерения напряжения, которые необходимы расцепителю для анализа сигнала, например, для измерения мощности и для выполнения функций защиты от перенапряжения, от понижения напряжения и от обратной мощности.

Серия выключателей SACE Emax DC компания АББ является новаторским продуктом, включающим в себя все преимущества интегрированного решения и, кроме того, дополненным несколькими интересными и важными характеристиками.

Интеграция всех этих компонентов делает данный автоматический выключатель одним из самых многофункциональных аппаратов со встроенной электронной системой. Его возможности во многом соответствуют концепции мехатронных систем.

Шунт

Шунт используется в качестве датчика тока¹⁾. Он формирует сигнал в виде напряжения, пропорционального силе тока. Выходной сигнал этого узла должен находиться в диапазоне 2,56–240 мВ.

Проблемой при разработке шунта (рис. 4) было сделать этот узел достаточно компактным, чтобы установить его внутри выключателя. Кроме того, он должен иметь сопротивление, достаточно высокое, чтобы управлять электронной схемой в расцепителе, и достаточно низкое, чтобы рассеивать мощность, допустимую для пластикового корпуса выключателя – и все это при номинальном токе и в условиях короткого замыкания (ток 100 кА в течение 0,5 с).

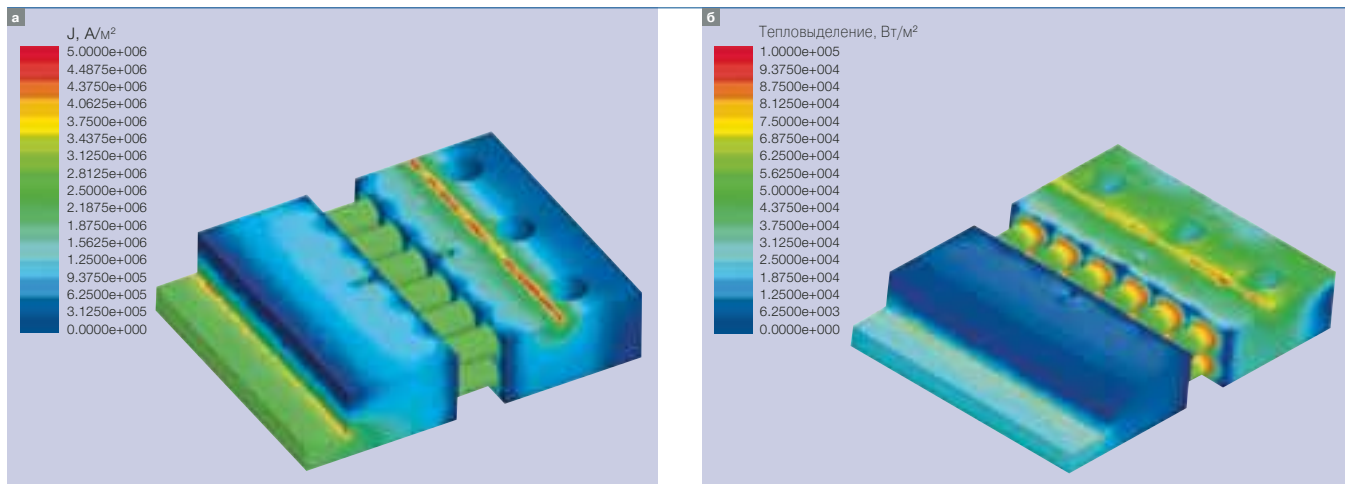
Минимальное сопротивление, которое при номинальном токе дает приемлемое для расцепителя отношение сигнал/шум, составляет 8 мкОм при токе 1600 А. Чтобы необходимые функции выполнялись при номинальном токе, температуру шунта поддерживали как можно более низкой за счет повышения теплопроводности (формула 1). С этой целью была произведена подробная оценка тепловыделения при помощи анализа (рис. 5) методом конечных элементов (FEM). Это позволило ограничить результирующий рост температуры на пластиковом корпусе шунта до необходимого уровня.

$$\text{Формула 1} \quad \theta_s = \frac{P_p}{G}$$

где
 P_p : рассеиваемая мощность
 G : теплопроводность
 θ_s : прирост температуры в устойчивом режиме

¹⁾ В автоматических выключателях переменного тока, как правило, используется трансформатор тока. Для постоянного тока такое решение неприемлемо.

5 Плотность тока (а) и тепловыделение (б) в шунте при номинальном токе



Единственный способ управлять температурой, так чтобы дать шунту возможность правильно работать в условиях короткого замыкания (100 кА в течение 0,5 с), – это повысить теплоемкость, потому что это явление можно рассматривать как адиабатический процесс (формула 2).

Формула 2
$$\theta_{ad} = \frac{R \cdot I^2 t}{C}$$

где
 $I^2 t$: пропускаемая энергия
 θ_{ad} : адиабатический прирост температуры
 R : сопротивление шунта
 C : теплоемкость

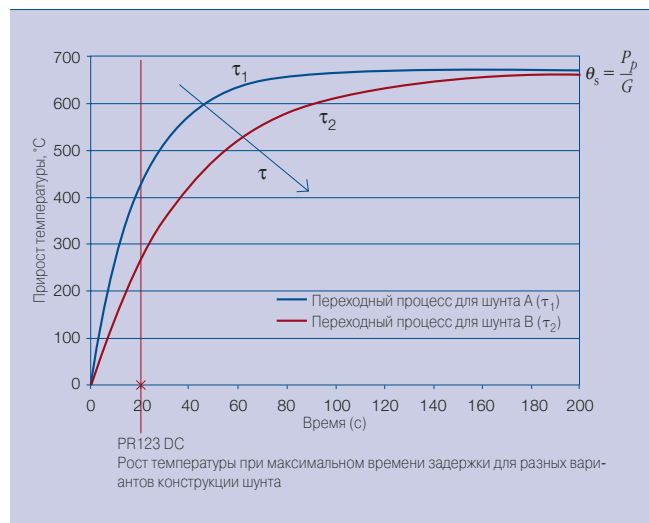
Формула 3
$$C = m \cdot c$$

где
 m : масса
 c : удельная теплоемкость

Для гарантии выполнения функций в условиях перегрузки, разработчики максимизировали тепловую постоянную времени шунтов, чтобы повысить их эксплуатационные качества при перегрузках (то есть уменьшить прирост температуры шунта во время перегрузки). Это было выполнено путем оптимизации конструкции узла шунт-выводы, то есть за счет повышения массы без снижения теплопроводности (формулы 4, 5).

На рис. 6 показаны тепловые переходные процессы для двух разных решений. Для одного и того же сопротивления красную кривую (более высокая постоянная времени) характеризует

6 Переходный процесс нарастания температуры с различными тепловыми постоянными времени при шестикратной перегрузке по току, $6I_n$ ($\tau_2 > \tau_1$)



меньший на 30% прирост температуры, прежде чем выключатель будет разомкнут после перегрузки длительностью 20 с.

Формула 4
$$\tau = \frac{C}{G}$$

Формула 5
$$\theta(t) = \theta_s \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right\}$$

где
 τ : тепловая постоянная времени
 θ : прирост температуры

Развязка

Поскольку используются шунты, то электронный расцепитель не отделен гальванически от токоведущих шин. Главная проблема, с которой при этом столкнулись, – как гарантировать адек-

ватный уровень развязки. Согласно стандарту на изделия IEC 60947-1 требуется, чтобы выдерживалось номинальное импульсное напряжение 14,4 кВ без необходимости отсоединять электронный расцепитель от корпуса автоматического выключателя. Это еще больше усложняется тем фактом, что электронный расцепитель подсоединен непосредственно к шинам питания, без какой-либо развязки или разделительных элементов (как в автоматических выключателях переменного тока, когда применяются трансформаторы тока). Данная проблема была решена путем включения в схему операционных усилителей с гальванической развязкой (по одному для каждого шунта).

Формирователь сигнала

Для того чтобы гарантировать максимальную точность измерения в широком диапазоне значений тока посредством максимального использования динамического диапазона АЦП, сигналы, поступающие с разных шунтов, нормируются при помощи аналоговой схемы.

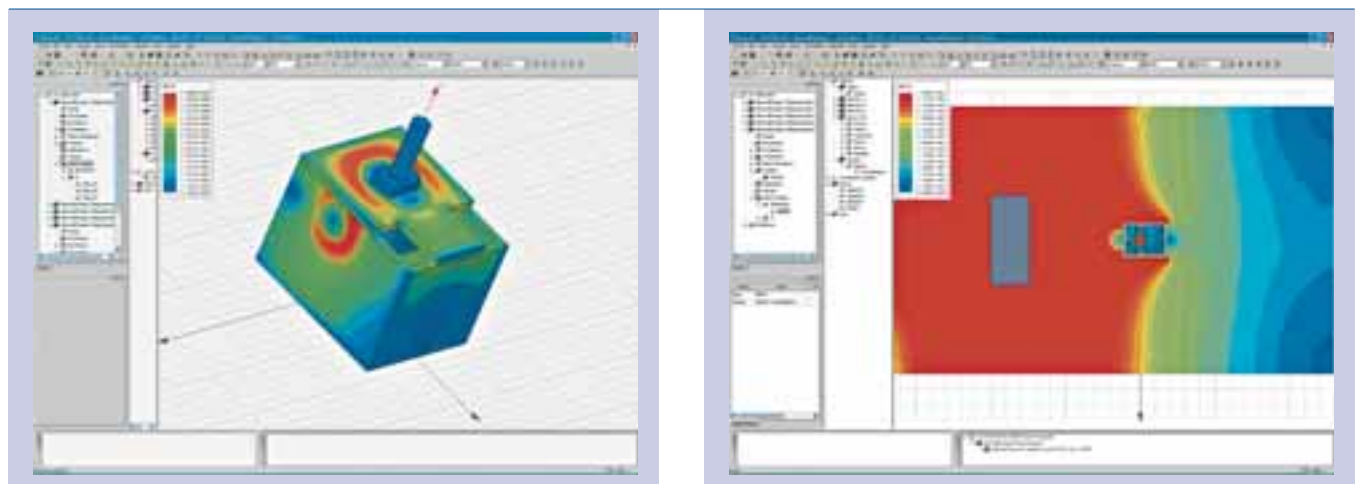
Преобразователь напряжения

Преобразователь напряжения питает расцепитель, а также выдает сигнал в виде напряжения, пропорционального напряжению первичной цепи. Оно используется для измерения первичного напряжения (через развязку с высоким импедансом).

Каскад питания

Каскад питания работает от двух возможных источников (от опционального внешнего источника с гальванической развязкой или от защищаемой цепи) и питает все элементы элек-

7 Расчет исполнительного механизма методом конечных элементов и моделирование его работы.



Инновации в изделиях

тронной системы напряжением необходимого уровня.

Процессор

При обработке сигналов используется параллельная архитектура с тремя процессорами: процессор низкой производительности для выполнения запуска и функций мгновенной защиты, цифро-

вой сигнальный процессор (DSP) для выполнения всех остальных функций и еще один процессор низкой производительности, содержащий информацию об автоматическом выключателе, в котором установлен данный электронный блок. Из-за очень низкого сопротивления шунта на вход блока подается очень слабый сигнал. Следовательно, средства измерения должны быть адаптированы

к такому сигналу. Этот сигнал усиливается и нормируется, чтобы сопоставить его с номинальным током автоматического выключателя (I_n). Чтобы гарантированно улучшить качество измерений, имеется два диапазона: один от 0 до $4 I_n$ и другой от $4 I_n$ до $12 I_n$. Динамический диапазон этого сигнала довольно значителен – около 50 дБ.

Эту схему оказалось возможным сделать высокочувствительной к малым сигналам, и в то же самое время она осталась устойчивой к сильным внешним возмущениям и токам короткого замыкания, благодаря выбору компонентов с хорошими рабочими характеристиками и продуманной разводке печатной платы.

Программное обеспечение было создано с помощью унифицированного языка моделирования (UML) и написано на языке программирования С. Оно полностью модульное и разработано в соответствии с наилучшей практикой проектирования ПО и внутренними корпоративными процедурами обеспечения высокого качества программ.

SACE Emax DC компании АББ – это единственный автоматический выключатель такого типа на рынке, занимающий особое место благодаря уникальному комплексу особенностей и характеристик.

Катушка отключения

Выключатель размыкается с помощью электромагнитного исполнительного механизма. Им управляют электронный расцепитель и питающийся от защищаемой цепи блок приоритетной защиты с двумя независимыми параллельными каналами.

Уникальное решение

SACE Emax DC компании АББ – это единственный автоматический выключатель такого типа на рынке. Он занимает особое место благодаря уникальному комплексу особенностей и характеристик, перечисленных ниже.

- Широкий выбор защитных функций и связанных с ними устанавливаемых параметров полностью использует преимущества электронного расцепителя со стандартными функциями (перегрузка, селективная и мгновенная защита от короткого замыкания) и усовершенствованными функциями (перенапряжение и пониженное напряжение, небаланс полюсов, обратная мощность, зонная селективность и тепловая память). Оба полюса защищены так, чтобы обнаруживать и противостоять всем возможным типам аварийных ситуаций в распределительных сетях.
- Нет необходимости во вспомогательном источнике питания: все функции защиты и измерений выполняются в автономном режиме при помощи преобразователя напряжения.
- Полная интеграция: расцепитель, датчики тока и напряжения, а также соединительные цепи в этом автоматическом выключателе полностью интегрированы. Автоматический выключатель официально сертифицирован и соответствует главным реестрам отгруженных товаров. Каждый блок проверен на производственном оборудовании.
- Отличные электрические характеристики: номинальные токи от 800 до 5000 А, рабочие напряжения до 1000 В, номинальное значение тока короткого замыкания до 100 кА и номинальный

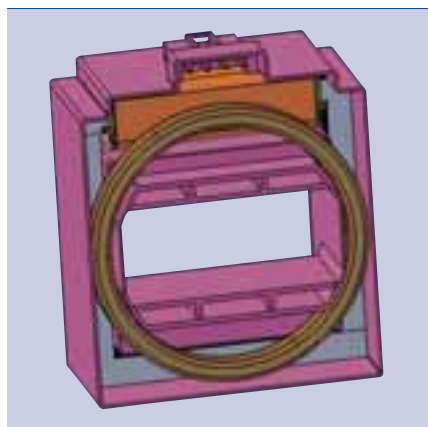
кратковременно выдерживаемый ток до 100 кА.

- Полный набор измерений: токи, напряжения, мощность, счетчик потребления электроэнергии.
- Широкий выбор функций связи и автоматизации: модуль связи с протоколами Modbus RTU и, благодаря системе FieldBusPlug¹⁾, Profibus и DeviceNet, возможность соединения Bluetooth для локальной конфигурации, программируемые дискретные выходы для оповещения и индикации аварии, а также функция управления нагрузкой.
- Улучшенный пользовательский интерфейс и диагностическая информация: графический дисплей, индикаторы коммутационного состояния, непрерывный контроль целостности электропроводки, портативный блок тестирования, запись данных для последних 20 срабатываний и 80 событий, а также функция регистратора данных (запись всех измерений с частотой выборки до 4800 Гц в течение 27 секунд с возможностью запуска по определенному сигналу).

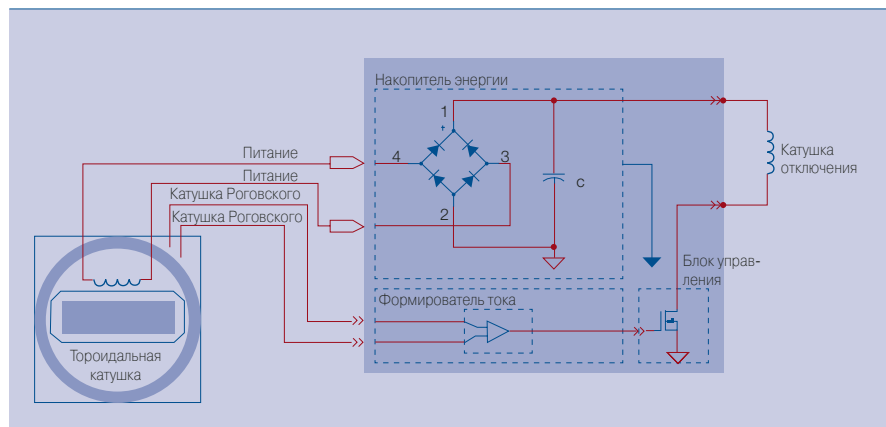
Эти особенности объединяет в себе SACE Emax DC, эталонный автоматический выключатель компании АББ для приложений постоянного тока. В настоящее время ни один другой продукт на рынке не достигает таких эксплуатационных качеств.

¹⁾ FieldBusPlug – это технология компании АББ, позволяющая разным аппаратам подсоединяться к различным типам полевых шин с помощью специального преобразователя интерфейса.

8 Внутренний вид датчика приоритетной защиты.



9 Модуль приоритетной защиты с питанием от защищаемой цепи.



В конструкции автоматического выключателя есть узел, к которому предъявляются весьма противоречивые требования. Это исполнительный механизм, который должен быть компактным, недорогим, потреблять небольшой ток и в то же время обладать высоким быстродействием и способностью избежать ложного срабатывания несмотря на воздействие очень сильных электромагнитных полей, генерируемых токами короткого замыкания, которые протекают в шине питания. Правильное определение размеров исполнительного механизма было осуществлено путем анализа магнитного поля методом конечных элементов (рис. 7).

Датчики приоритетной защиты

Задача датчиков приоритетной защиты – обеспечить выходной сигнал в случае неустойчивого короткого замыкания. Такие условия возникают, когда на выключатель, который был включен на короткозамкнутую линию, подается напряжение от вышестоящего автоматического выключателя.

С этим решением потребителям нет необходимости комбинировать различные компоненты.

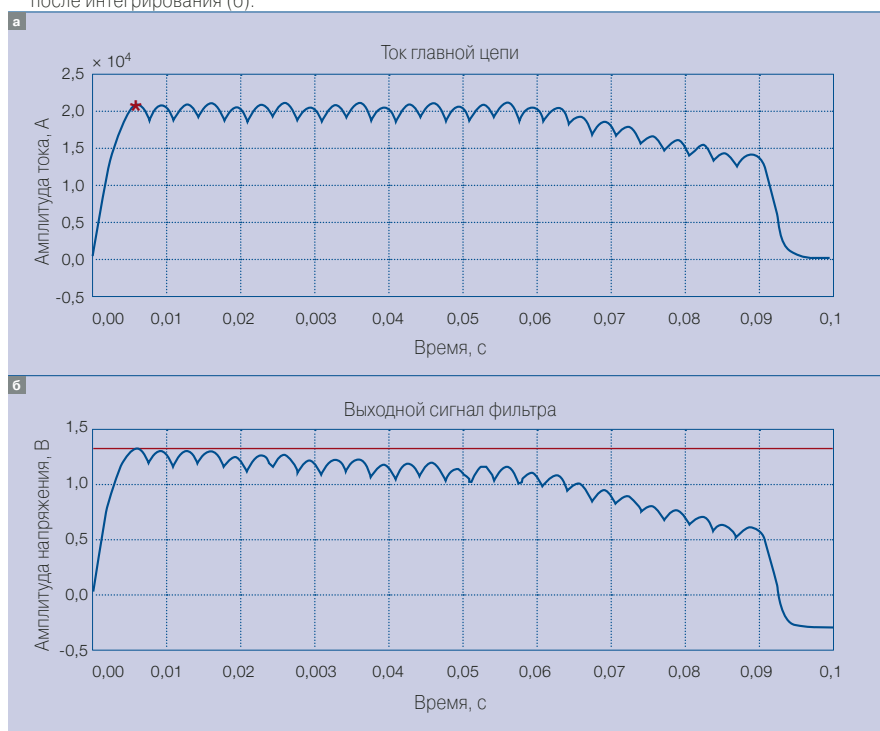
Датчик состоит из двух частей: из трансформатора тока для питания электронного модуля и катушки отключения и из катушки Роговского для получения сигнала, подлежащего измерению. Такие датчики могут гарантировать необходимый уровень точности во всем диапазоне токов. Они также гарантируют правильный уровень развязки между шинами первичного питания и вспомогательными цепями (рис. 8).

Автономный модуль приоритетной защиты

Этот аналоговый электронный модуль предназначен для того, чтобы гарантировать мгновенную защиту, в каком бы состоянии ни был источник питания. Проблема состояла в том, чтобы обеспечить защиту без дополнительного источника питания и даже при посадке напряжения в защищаемой цепи. Предназначенный для этого модуль (рис. 9) был разработан так, чтобы он мог сработать в тех случаях, когда электронный расцепитель будет обесточен.

Питание на этот модуль подается с трансформатора тока, который работает за счет градиента постоянного тока в течение короткого замыкания. Этот ток измеряется с помощью катушки Роговского. Тем самым обеспечивается выходной сигнал, пропорциональный производной тока. Формирователь тока получает сигнал

10 Записанные в ходе испытаний результаты моделирования с использованием тока главной цепи, поступающего с выпрямительного моста с постоянной времени 2 мс (а), и выходной сигнал фильтра после интегрирования (б):



с этой катушки и пропускает его через аналоговый фильтр (или интегратор), чтобы восстановить первичный сигнал. Этот выходной сигнал сравнивается с уставкой, установленной при помощи DIP-переключателей, и если он превышает уставку, то на катушку отключения подается команда на размыкание.

Широкий выбор функций защиты, измерения и связи обеспечивает более эффективное управление.

Результат моделирования, где используется ток главной цепи, показан на рис. 10а. Особенность этого примера, записанного в процессе испытаний, – это равная 2 мс постоянная времени, обусловленная наличием выпрямительного моста. Соответствующий сигнал на выходе фильтра после интегрирования показан на рис. 10б.

Весьма успешная разработка

Успешное решение всех сложных проблем, с которыми разработчики столкнулись в этом проекте, привел к разработке новаторского компактного изделия, обеспечивающего удовлетворение для всех возможных потребностей в защите и управлении в системах постоянного тока.

С этим решением потребителям нет необходимости комбинировать различные компоненты, они могут положиться на интегрированное изделие, которое было проверено и сертифицировано производителем. Имеются также существенные преимущества в части уменьшения габаритных размеров установки по сравнению с решениями, где применяются внешние датчики и реле, а также снижения требований к проектированию.

Доступность широкого выбора функций защиты, измерения и связи обеспечивает потребителей более эффективными средствами управления и защиты для их электросистем.

Джованни Фрассинети
ABB SACE S. P.A.
Бергамо, Италия
giovanni.frassinetti@it.abb.com