



УДК 621.314: 621.316

А. В. Агунов

Петербургский государственный университет путей сообщения

СГЛАЖИВАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

Предложен силовой активный сглаживающий фильтр для тяговых подстанций постоянного тока, позволяющий полностью устранить пульсации выпрямленного напряжения. Он реализован на базе силового интеллектуального модуля с микроконтроллерным управлением при использовании методов цифровой обработки сигналов. Данное техническое решение является гибким и эффективным и позволяет выполнить оптимальную фильтрацию выпрямленного напряжения.

тяговые подстанции, активный сглаживающий фильтр, выпрямленное напряжение, пульсации напряжения, цифровая обработка сигналов.

Введение

В настоящее время на тяговых подстанциях (ТПС) постоянного тока электрифицированных железных дорог в основном используются 6-пульсные неуправляемые и управляемые выпрямительные агрегаты (ВА), собранные по мостовой схеме Ларионова, с выходным выпрямленным напряжением U_d в контактной сети (КС), равным (при номинальной нагрузке) 3,3 кВ [1].

Выпрямленное напряжение на таких ТПС состоит из постоянной составляющей U_{d0} , равной его среднему значению, и переменной составляющей $U_{d\sim}$, определяемой суммой высших гармоник порядка $n = kq$, где q – кратность пульсации выпрямленного напряжения; $k = 1, 2, 3, \dots$. Состав высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения при синусоидальном и симметричном питающем напряжении определяется числом пульсаций и не зависит от углов управления и коммутации. Амплитуды же от-

дельных гармонических составляющих, с изменением глубины управления и угла коммутации, меняются, изменяя амплитуду пульсаций выпрямленного напряжения, что значительно снижает диапазон регулирования напряжения выпрямителя [2]. Кроме того, зачастую, в реальных условиях питающее напряжение выпрямителя имеет существенное искажение и несимметрию, при этом в кривой выпрямленного напряжения появляются неканонические гармоники и субгармонические составляющие, что вынуждает включать в состав сглаживающих устройств дополнительные резонансные контуры, настроенные на эти гармонические составляющие, устанавливать специальные двухзвенные или апериодические фильтры [3]. Такие меры требуют больших капитальных затрат и приводят к увеличению дополнительных потерь энергии, ухудшению массогабаритных показателей и энергетических характеристик сглаживающего устройства ТПС постоянного тока при достаточно по-

средственном сглаживании выпрямленного напряжения.

Лучших результатов для обеспечения допустимого значения переменной составляющей выпрямленного напряжения (по условиям нормальной работы смежных устройств связи и железнодорожной автоматики) можно добиться заменой на ТПС постоянного тока пассивных LC -фильтров сглаживающими устройствами на основе силовых активных фильтров (САФ) [4].

1 Схемотехническая реализация САФ

Структурная схема последовательного САФ-напряжения, устраняющего пульсации выпрямленного напряжения за счет инъекции подавляемых гармоник напряжения в контактную сеть в противофазе, представлена на рис. 1. Здесь L_d – сглаживающий реактор, Tr – согласующий трансформатор, ДН – делитель напряжения, СУ – система управления, СИМ – силовой интеллектуальный модуль.

Силовая часть последовательного САФ-напряжения выполнена на базе силового интеллектуального модуля (на $IGBT$ - либо $MOSFET$ -транзисторах мощностью до 20 кВА и частотой переключения до 20 кГц), включенного в цепь сглаживающего реактора через согласующий трансформатор, и представляет собой инвертор напряжения с тре-

угольной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

2 Система управления САФ

Для управления инвертором используются методы цифровой обработки сигналов (ЦОС), которые реализуются с помощью сигнального процессора (на PIC – *Peripheral Interface Controller*) на микроконтроллерах с $RISC$ -архитектурой семейства $PIC 16F87X$ фирмы *Microchip* или DSP (*Digital Signal Processor*) на контроллерах семейства $TMS 320LF2407$ фирмы *Texas Instruments*), имеющего сокращенную систему высокоэффективных команд, низкую стоимость, а также встроенные периферийные модули ШИМ, аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) и таймеры, простого в использовании.

Принципы работы системы управления последовательного САФ показаны на рис. 2.

Входной сигнал, поступающий с делителя напряжения, оцифровывается с помощью встроенного модуля АЦП и поступает в виде дискретных отсчетов на цифровой фильтр низкой частоты (ЦФНЧ), при помощи которого вычисляются соответствующие отсчеты постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

Выделение гармонических составляющих входного сигнала осуществляется непрямым способом, т. е. за счет вычитания измеренных

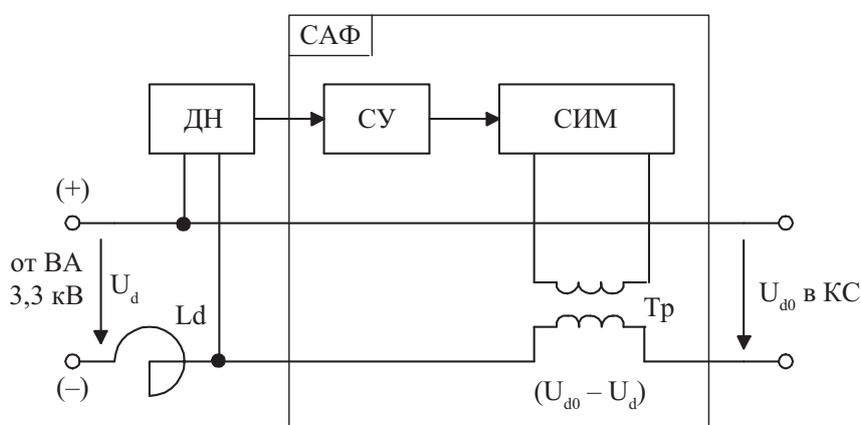


Рис. 1. Структурная схема последовательного силового активного сглаживающего фильтра ТПС постоянного тока

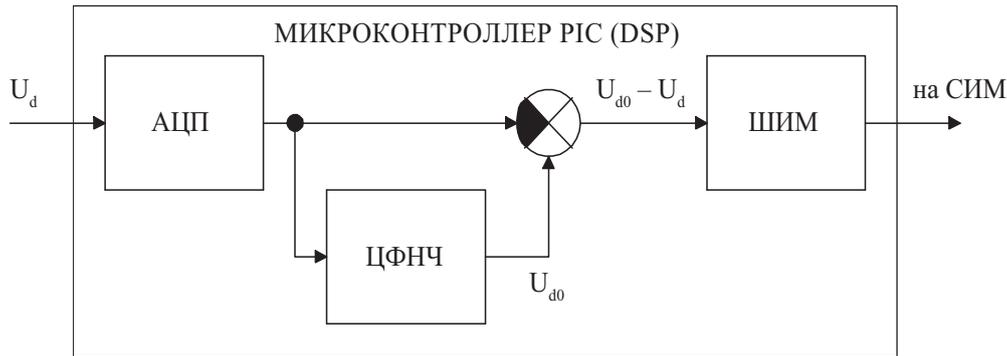


Рис. 2. Принципы работы системы управления последовательного силового активного сглаживающего фильтра

отсчетов полного входного сигнала из соответствующих вычисленных отсчетов постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

Полученные таким образом значения с выхода встроенного модуля ШИМ в виде переключающих функций поступают на затворы силовых транзисторов мостового инвертора, с выхода которого напряжение подаваемых гармоник инжектируется в контактную сеть в противофазе, в результате чего суммарное напряжение в КС (выпрямленное и инвертора) становится строго постоянным (прямым без пульсаций).

3 Экспериментальные результаты

На рис. 3 и 4 приведены экспериментальные осциллограммы работы последовательного САФ-напряжения, полностью

устраняющего пульсации выпрямленного напряжения.

Из осциллограмм (см. рис. 3) видно, что до того, как САФ начал свою работу, напряжение в КС содержало широкий спектр гармоник, однако после начала работы САФ-напряжение в КС становится строго постоянным, т. е. не содержащим переменной составляющей. Здесь напряжение, генерируемое САФ, является результатом разницы между постоянной составляющей выпрямленного напряжения и полным выпрямленным напряжением.

В процессе эксперимента исследовалась фильтрующая способность рассматриваемого технического устройства в зависимости от режима «наброса» и «сброса» нагрузки тяговой сети (рис. 4). Эксперимент показал устойчивость работы предложенного сглаживающего устройства в широком диапазоне изменения тока тяговой сети и полную

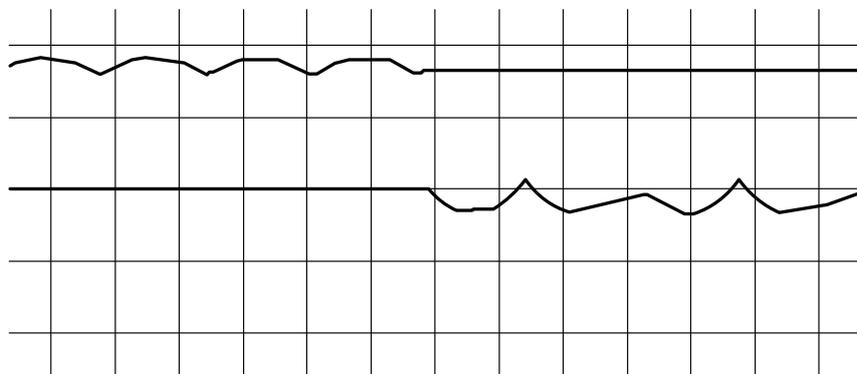


Рис. 3. Осциллограммы напряжения в контактной сети (вверху) и напряжения активного фильтра (внизу). Масштабы: напряжения – 2 кВ/дел., времени – 2 мс/дел.

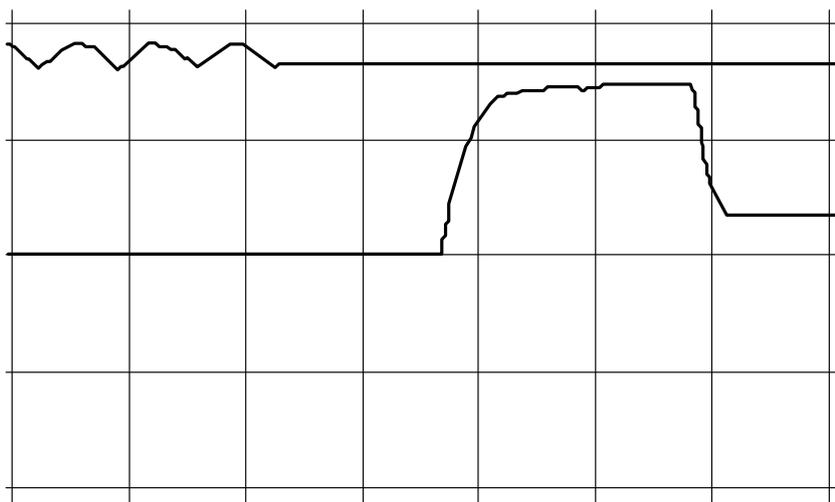


Рис. 4. Осциллограммы напряжения (вверху) и тока (внизу) в контактной сети.
Масштабы: напряжения – 2 кВ/дел., тока – 2 кА/дел., времени – 5 мс/дел.

независимость его фильтрующей способности.

Заключение

Использование сглаживающих устройств ТПС постоянного тока на базе САФ позволяет обеспечить полную компенсацию переменной составляющей выпрямленного напряжения и отказаться от сглаживающих устройств традиционного типа, основным недостатком которых является невозможность полного подавления всех гармонических составляющих выпрямленного напряжения.

Следует отметить, что отличительной чертой предложенного последовательного САФ-напряжения являются преимущества, присущие устройствам силовой электроники с ЦОС, а именно:

1. Нечувствительность характеристик САФ к разбросу параметров входящих в него элементов, их временному и температурному дрейфам.

2. Небольшие габариты и высокая надежность работы САФ, связанные с использованием СИМ, в которых силовые транзисто-

ры объединены со схемами программного управления, различными защитами (в том числе от коротких замыканий и от перенапряжений) и схемами диагностирования.

3. Легкость изменения параметров и характеристик САФ благодаря модификации программного обеспечения микропроцессорных контроллеров СУ.

4. Возможность реализации адаптивных САФ с изменяющимися в процессе работы параметрами и алгоритмами управления.

Библиографический список

1. **Электрические** железные дороги : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. А. В. Плакса и В. Н. Пупынина. – М. : Транспорт, 1993. – 280 с.

2. **Электронная** техника и преобразователи : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А. Т. Бурков. – М. : Транспорт, 1999. – 464 с.

3. **Двенадцатипульсовые** полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Под ред. М. Г. Шалимова. – М. : Транспорт, 1990. – 127 с.

4. **Управление** качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах / А. В. Агунов. – СПб. : Санкт-Петербургский гос. морской технический ун-т, 2009. – 134 с.