

# Устройство для выравнивания напряжений на элементах батареи суперконденсаторов

Михаил Сизов (Москва)

В статье описано устройство «Нивелир-30», которое решает проблему обеспечения длительного срока службы батареи суперконденсаторов, соединённых последовательно. Рассмотрена схема, которая обеспечивает дифференциальную компенсацию токов утечки конденсаторов, выравнивает напряжения на конденсаторах и осуществляет контроль их исправности. Приводятся результаты испытаний и принципиальная схема устройства.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время суперконденсаторы начали активно применяться в гибридных технологиях на транспорте. Проблема обеспечения длительного срока службы батареи, состоящей из большого количества конденсаторов, соединённых последовательно, является достаточно актуальной. Например, если накопитель энергии тепловоза должен иметь напряжение 900 В, а максимальное напряжение одного суперконденсатора составляет 1,5 В при ёмкости 10 000 Ф [1], то формируется батарея из 600 конденсаторов, соединённых последовательно, с суммарной ёмкостью 16 Ф.

Небольшие отличия в характеристиках отдельных конденсаторов (по ёмкости, токам утечки и т.д.) приводят в процессе эксплуатации батареи к значительному разбросу напряжений отдельных конденсаторов. При этом снижается уровень энергии отдаваемой батареей в нагрузку, происходит перезаряд и глубокий разряд отдельных конденсаторов, который

может привести к их переполюсовке. В итоге как отдельные конденсаторы, так и батарея в целом выходят из строя.

Разбаланс напряжений во время зарядки может возникнуть из-за того, что ёмкости конденсаторов, соединённых последовательно в батарею, отличаются. При зарядке одинаковым током напряжение на конденсаторе с большей ёмкостью будет ниже, чем на конденсаторе с меньшей ёмкостью. Для устранения влияния этих факторов необходимо устройство, которое обеспечивает дифференциальную компенсацию токов утечки конденсаторов, выравнивает напряжения между конденсаторами и осуществляет контроль их исправности.

Рассмотрим один из способов выравнивания напряжений для 600 конденсаторов, соединённых последовательно. Батарея конденсаторов делится на 20 модулей, по 30 элементов в каждом, тогда возникают две подзадачи:

- выравнивание напряжений на каждом элементе модуля, для чего необ-

ходимо низковольтное устройство «Нивелир-30» (20 шт.), которое будет рассмотрено ниже;

- выравнивание напряжений на каждом модуле; для этого требуется высоковольтное устройство «Нивелир-20» (1 шт.), в котором используются аналогичные способы выравнивания напряжений.

Каждый модуль, состоящий из 30 конденсаторов, обслуживает устройство «Нивелир-30» (Нив-30), которое было разработано в 2000 г. [2]. Ниже приведено описание этого устройства.

Нив-30 – это двухтактный обратнотактовый DC/DC-преобразователь [3, 4], в котором на первом (прямом) такте работы энергия запасается в многообмоточном трансформаторе (в первичной обмотке), а на втором (обратном) такте энергия возвращается в источник с помощью размагничивающей обмотки или передаётся в нагрузку с помощью одной или нескольких вторичных, размагничивающих обмоток. Этот тип преобразователя является одним из самых популярных типов импульсных источников питания. Его уникальные свойства позволяют решать нестандартные задачи, к которым относится и проблема выравнивания напряжений на конденсаторах.

## ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА «НИВЕЛИР-2»

Чтобы пояснить принцип действия Нив-30, рассмотрим работу схемы устройства, которое выравнивает напряжение на двух конденсаторах. На рисунке 1 показана схема устройства Нив-2. При моделировании суперконденсаторы С7 и С8 были заменены двумя источниками питания. Значения напряжений этих источников отражают степень заряда реальных конденсаторов. Замена суперконденсаторов на источники питания с фиксированным напряжением позволяет упростить моделирование физических процессов выравнивания напряжений на конденсаторах. Суперконденсатор, имеющий ёмкость 10 000 Ф и напряжение 1,5 В, облада-

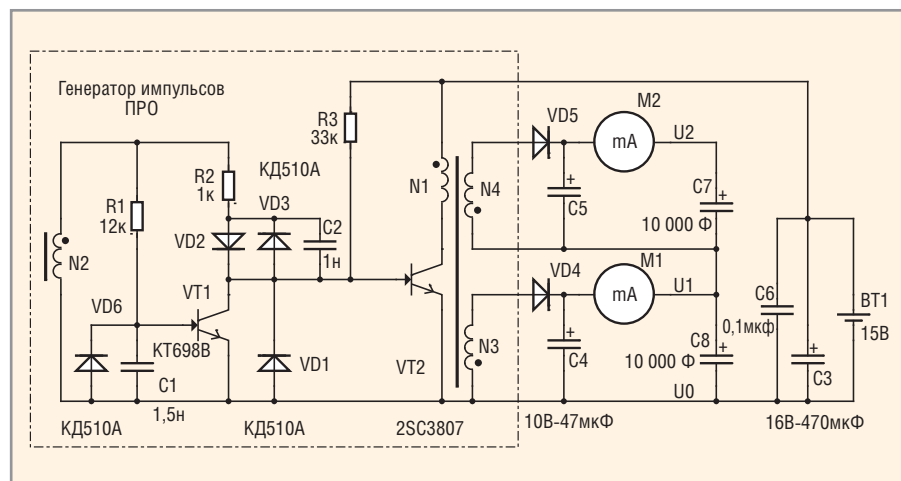


Рис. 1. Схема устройства Нив-2

ет энергией ( $U^2 \times C/2$ ) = 11 250 Дж. Эта энергия соответствует аккумуляторной батарее ёмкостью 2,6 Ач с напряжением 1,2 В, поэтому замена суперконденсатора на источник питания допустима.

Схема замещения суперконденсатора показана на рисунке 2. Его сопротивление утечки ( $R_{ут}$ ), в зависимости от напряжения, может изменяться в широких пределах – от 1 МОм до 50 Ом. Задача нивелира – компенсировать токи утечки конденсаторов таким образом, чтобы напряжения на них оставались равными.

Импульсный генератор Нив-2 выполнен на двух транзисторах и накопительном трансформаторе с четырьмя обмотками (для упрощения все обмотки имеют одинаковое число витков):

- N1 – первичная обмотка, индуктивность которой  $L_f$  определяет энергию, которая будет запасаться в трансформаторе;
- N2 – обмотка положительной обратной связи для возбуждения генерации колебаний в схеме;
- N3 и N4 – размагничивающие обмотки (обмотки обратного хода), которые подключаются к нагрузке через диоды VD4 и VD5. Полярность включения обмоток и диодов выбрана таким образом, чтобы не оказывать влияние на процесс накопления энергии в трансформаторе.

Резистор R5 задаёт небольшой начальный ток базы, который приоткрывает транзистор VT2, далее происходит лавинообразное открытие транзистора за счёт действия положительной обратной связи через обмотку N2. Напряжение  $U_{N2}$  и резистор R2 определяют рабочий базовый ток транзистора VT2, а время открытого состояния транзистора VT2, когда происходит накопление электромагнитной энергии в трансформаторе, определяется цепочкой R1, C1, которая с задержкой открывает транзистор VT1. Транзистор VT1 перехватывает базовый ток транзистора VT2, который переходит из режима насыщения в линейный режим работы (прикрывается), далее происходит лавинообразное закрытие транзистора VT2 за счёт действия положительной обратной связи через обмотку N2.

После выключения транзистора VT2 на всех обмотках трансформатора изменяется полярность напряже-

ний и происходит их быстрый рост. Начинается второй такт работы схемы преобразователя – размагничивание сердечника трансформатора. Напряжённость магнитного поля в сердечнике, которая определяется произведением  $I_f N_1$  (ампер-витки первичной цепи), не может резко изменить своё значение, поскольку обмотки трансформатора магнитосвязаны. Когда в первичной цепи трансформатора ток исчезает, за счёт взаимной индукции он появляется одновременно во вторичных обмотках N3 и N4. Поскольку напряжения на конденсаторах равны (1,5 В), падения напряжения на однотипных диодах можно считать равными.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

- обе вторичные обмотки участвуют в размагничивании трансформатора;
- амплитуды токов вторичных обмоток равны между собой, их сумма равна амплитуде тока первичной обмотки, поэтому выполняется равенство:

$$I_1 N_1 = I_3 N_3 + I_4 N_4; \quad (1);$$

- длительность такта размагничивания трансформатора в девять раз больше длительности намагничивания, т.к. возврат энергии трансформатора происходит в конденсаторы C7 и C8 с напряжением 1,5 В, а накопление энергии – от источника с напряжением 15 В. Без потерь энергии в элементах схемы (падения напряжения на диодах VD4, VD5 и активных сопротивлениях обмоток), длительность такта размагничивания трансформатора должна быть в десять раз больше длительности намагничивания;
- при большой разнице напряжений на конденсаторах (0,2 В) только одна обмотка N3 участвует в размагничивании трансформатора. Уровень 0,2 В соответствует напряжению отсечки тока для диода Шоттки VD4, поэтому отсутствует ток в обмотке N4;
- амплитуда тока вторичной обмотки N3 равна амплитуде тока первичной обмотки, и выполняется равенство (1), т.к. ток в обмотке N4 равен нулю;
- по мере уменьшения разницы напряжений на конденсаторах, появляется ток в обмотке N4, и его доля в выражении (1) возрастает;

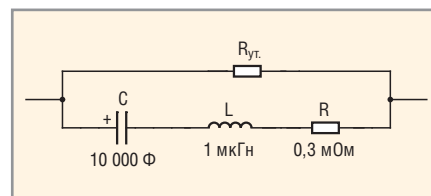


Рис. 2. Схема замещения суперконденсатора

- во время размагничивания трансформатора, напряжения на всех обмотках с равным числом витков имеют одинаковое значение, которое определяется конденсатором с наименьшим напряжением и падением напряжения на диоде, через который протекает ток размагничивания трансформатора. Это свойство схемы обратного преобразователя позволяет определить минимальное напряжение на элементе в батарее последовательно соединённых конденсаторов с помощью дополнительной (контрольной) обмотки трансформатора, которая должна иметь такое же число витков, как и все вторичные обмотки.

## ОПИСАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА «НИВЕЛИР-30»

На рисунке 3 показана электрическая схема устройства «Нивелир-30» (Нив-30) и батарея, состоящая из 30 суперконденсаторов SC1 – SC30 (показана только часть батареи). Схема реального устройства имеет следующие отличия от схемы Нив-2, рассмотренной выше:

- для уменьшения индуктивности рассеяния и увеличения связи между обмотками трансформатора изготавливается путём параллельной намотки (35 проводов одним жгутом) всех обмоток на сердечник трансформатора. Первичная обмотка Нив-30 составлена из трёх обмоток общего жгута, так как намагничивание трансформатора происходит от источника с напряжением 45 В, а Нив-2 – от 15 В.
- в схему Нив-30 добавлено устройство для мониторинга минимального напряжения на конденсаторах модуля. Контроль осуществляется путём сравнения среднего напряжения на конденсаторе (делитель 1 : 30 собран на резисторах R6, R7, R8) с напряжением размагничивания, которое формируется контрольной обмоткой W35, высокочастотным фильтром R4C34, выпрямителем VD35 и низкочас-

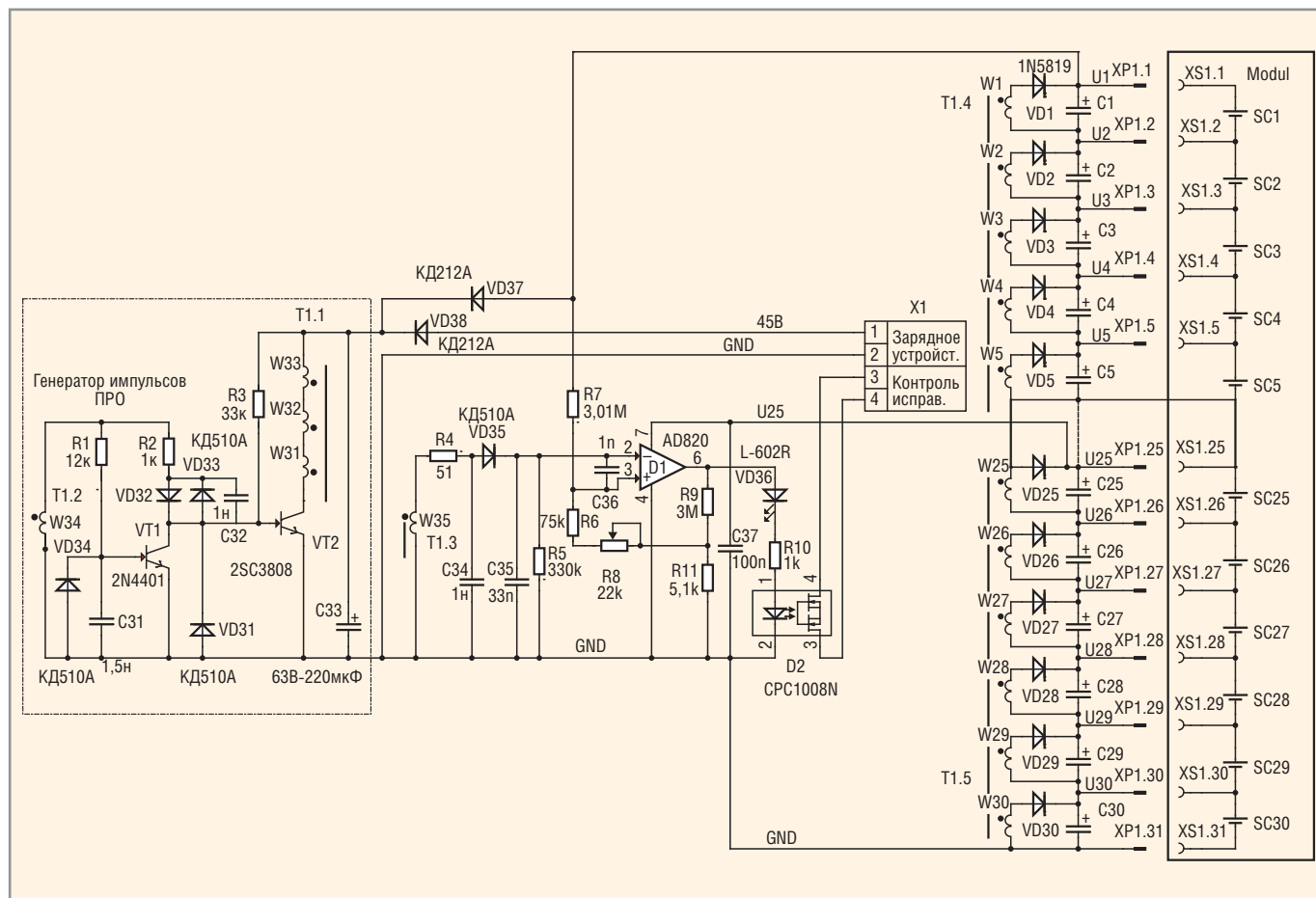


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема устройства «Нивелир-30»

тотным фильтром R5, C35. Элемент сравнения выполнен на операционном усилителе D1, который включен по схеме компаратора с положительной обратной связью по цепи R9, R11. Когда напряжение контрольной обмотки уменьшится до минимально допустимого значения, произойдет переключение компаратора из состояния лог. 0 в лог. 1, на лицевой панели модуля включится светодиод VD36 «Отказ», и оптрон D2 по гальванически развязанным цепям (X1 контакты 3, 4), передаст сигнал о неисправности модуля в систему контроля накопителя;

- питание схемы контроля осуществляется от шести крайних конденсаторов модуля. Ток потребления схемы контроля будет автоматически компенсироваться схемой Нив-30;
- в устройстве Нив-30 осуществляются два варианта выравнивания напряжений конденсаторной батареи.

При подключении зарядного устройства (ЗУ) к цепям 1 и 2 разъема X1 устройство работает следующим образом. Если напряжение батареи

меньше напряжения ЗУ, то питание первичной обмотки обратноходового преобразователя осуществляется от ЗУ, так как диод VD37 будет закрыт. На первом цикле работы преобразователя электромагнитная энергия, которая запасается в трансформаторе, берется из ЗУ. На втором цикле запасенная энергия трансформатора передается в конденсаторы батареи, происходит выравнивание напряжений на конденсаторах и последующее повышение этих напряжений до номинального уровня 1,5 В, если напряжение ЗУ равно 45 В. Как только напряжение батареи достигнет или станет больше напряжения ЗУ, откроется диод VD37, и питание первичной обмотки обратноходового преобразователя будет осуществляться от конденсаторов батареи, а ЗУ отключится. В установившемся режиме ток потребления от ЗУ определяется токами утечки всех конденсаторов, потерями в устройстве контроля и преобразователе. Если ЗУ отсутствует, то питание первичной обмотки обратноходового преобразователя осуществляется от конденсаторов батареи.

### РАБОТА УСТРОЙСТВА «НИВЕЛИР-30» В СОСТАВЕ МОДУЛЯ С 30 СУПЕРКОНДЕНСАТОРАМИ

В составе модуля на первичную обмотку трансформатора подается суммарное напряжение всех 30 конденсаторов. На первом такте работы преобразователя в первичной обмотке трансформатора запасается электромагнитная энергия, которая временно берется из всех конденсаторов модуля, при этом доля отбираемой энергии у каждого конденсатора прямо пропорциональна величине напряжения на нем.

На втором цикле, когда силовой транзистор VT2 преобразователя закрывается, происходит изменение полярности напряжений на всех обмотках трансформатора, выходные обмотки W1-W30 трансформатора, имеющие одинаковое число витков, становятся источниками тока, и электромагнитная энергия, запасенная в трансформаторе, возвращается в конденсаторы модуля. Если напряжения на всех конденсаторах одинаковые, то и токи выходных обмоток тоже одинаковые. Происходит возврат энергии равномерно во все конденсаторы.

Если отсутствует равенство напряжений на конденсаторах, то ток будет протекать только в выходной обмотке, которая подключена через диод к конденсатору с наименьшим напряжением. Напряжения на выходных обмотках в это время будут определяться не напряжением батареи, а напряжением на конденсаторе, который больше всех разряжен; произойдёт ограничение напряжений на всех выходных обмотках трансформатора из-за равенства числа витков в них. Поэтому происходит возврат энергии только в конденсатор с наименьшим напряжением. Напряжение на этом конденсаторе и, следовательно, на всех выходных обмотках трансформатора увеличивается, и наступает очередь возврата энергии уже в другие конденсаторы с более высокими напряжениями.

Так происходит передача энергии от конденсаторов с большим напряжением к конденсаторам с меньшим напряжением, и напряжения на конденсаторах выравниваются. Процесс выравнивания напряжений на конденсаторах возможен, если мощность преобразователя превышает мощность токов утечек всех конденсаторов модуля. Мощность преобразователя определяется индуктивностью первичной обмотки трансформатора, соотношением между первичной обмоткой трансформатора и вторичными обмотками, частотой преобразования и напряжением батареи.

В установленном режиме, когда через выходные обмотки W1 – W30 и диоды VD1 – VD30 протекают только токи утечек конденсаторов SC1 – SC30, точность выравнивания напряжений на конденсаторах определяется только разбросом падений напряжений на диодах. Для диодов Шоттки эта величина не превышает  $\pm 20$  мВ.

На рисунке 4 приведены результаты испытаний устройства «Нивелир-30» в составе модуля с 30 суперконденсаторами EC501 [1]. По оси X отложено время в часах, а по оси Y – напряжение на элементах модуля. Перед включением устройства выравнивания элементы SC1 и SC13 были разряжены до уровней 1,169 В и 0,876 В соответственно. Разброс напряжений на остальных элементах не превышал  $\pm 20$  мВ. В данном эксперименте к цепям 1 и 2 разъёма X1 было подключено маломощное зарядное устройство

(39,7 В/30 мА), которое поддерживало общее напряжение на модуле неизменным.

График изменения напряжений на конденсаторах (см. рис. 4) показывает, что после включения устройства выравнивания начинается быстрый рост напряжения только на одном конденсаторе SC13, который имел наименьшее напряжение. Рост напряжения на другом конденсаторе SC1 начинается с запозданием, поскольку вся энергия, запасаемая в трансформаторе, ранее передавалась в конденсатор SC13. После сближения напряжений на конденсаторах SC13 и SC1, скорости роста этих напряжений стали равными и уменьшились по величине. В основной группе конденсаторов наблюдается небольшой спад напряжений (20...30 мВ), который связан с ростом напряжений на SC13 и SC1; суммарный рост напряжений на двух конденсаторах составил 560 мВ. Так как напряжение на модуле не изменилось, то на каждом из 28 конденсаторов напряжение уменьшилось на 20 мВ.

На рисунке 5 приведены результаты испытаний устройства «Нивелир-30» в составе модуля с 30 суперконденсаторами EC501 при других начальных условиях. По оси X отложены номера элементов модуля, а по оси Y – напряжения на элементах модуля. Перед включением устройства выравнивания, элементы модуля имели значительный разброс напряжений (синяя кривая) – от 1,06 до 1,18 В. В данном эксперименте к цепям 1 и 2 разъёма X1 зарядное устройство не было подключено. Через 18 ч (красная кривая) были измерены новые значения напряжений на элементах модуля. Сравнивая эти кривые, можно сделать следующие выводы:

- элементы с наименьшим напряжением 16, 18 и 19 получили дополнительный заряд от устройства «Нивелир-30» и повысили свои напряжения;
- элементы с наибольшим напряжением 1, 2, 5 – 10 и 22 – 30 уменьшили свои напряжения. Их энергия обеспечивала работу схемы и рост напряжений на элементах с наименьшим напряжением.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов подтвердили возможности предложенного устройства выравнивать напряжения

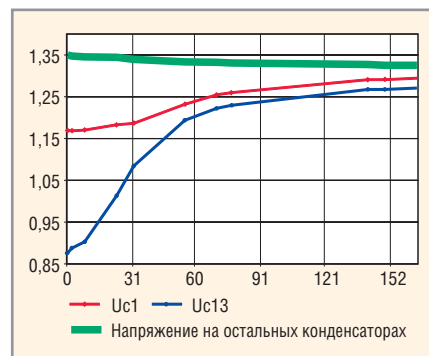


Рис. 4. Результаты испытаний устройства «Нивелир-30» в составе модуля с 30 суперконденсаторами

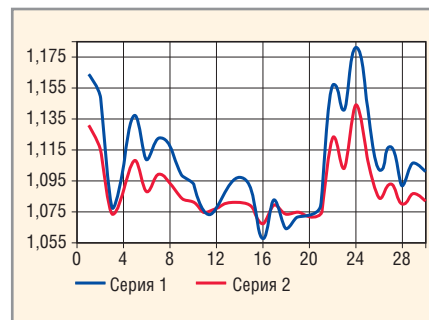


Рис. 5. Процесс выравнивания напряжений на элементах модуля



Рис. 6. Печатная плата устройства «Нивелир-30»

на конденсаторах, включенных последовательно. Время выравнивания напряжений зависит от мощности преобразователя, ёмкости конденсаторов и первоначального разбаланса напряжений на них.

На рисунке 6 показана фотография печатной платы устройства «Нивелир-30», которая входит в состав модуля с 30 суперконденсаторами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.elton-cap.com>.
2. Патент RU 2 293 417 C2 МПК H02J 7/34 2002 г.
3. <http://bludger.narod.ru/smps/Flyback-R01.pdf>.
4. <http://www.mobipower.ru/modules.php?name=Pages&pa=show-page&pid=42>.

