

ПРИМЕНЕНИЕ «БОЛЬШИХ» КОМПЛЕКТОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ И СИСТЕМАХ КАЧЕСТВА/РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

А.И. Беляков, ЗАО «ЭЛИТ»,
305026, г.Курск, пр-т Ленинского комсомола,40,
e-mail: elit@sovtest.ru, тел.(07122) 4-61-51

*Представлено на «Международном семинаре
по перспективным конденсаторам – 2005»,
11-13 июля 2005 г., Сан-Диего, США*

ВВЕДЕНИЕ.

Аспекты развития альтернативной (возобновляемой) энергетики находятся под пристальным вниманием правительств развитых государств. Ряд европейских стран предполагают достижение уровня альтернативной энергетики 10% от всех используемых видов энергии к 2011 году. В ряде штатов США, особенно в Колорадо, широко используются ветроэнергетические системы, фотовольтаика, биогаз и пр. уже в обыденном смысле среди частных компаний.

Системы повышения качества/распределения электроэнергии становятся в последнее время всё более значимыми и не только с позиций полного и качественного энергоснабжения, но и как фактор экономической безопасности. Ущерб от долгих отключений энергии подтверждает необходимость модернизации систем и подстанций ЛЭП.

Традиционно, в качестве промежуточного источника тока между первичным альтернативным источником и потребителем используется аккумуляторная батарея. Она же обеспечивает некоторую автономию подстанций ЛЭП.

В настоящей статье анализируются типы источников тока для вышеупомянутого применения. Показано, что батареи не являются оптимальным выбором, а в ряде случаев просто не могут обеспечивать требования заказчиков. С другой стороны, электрохимические конденсаторы (суперконденсаторы, ультраконденсаторы и др.), обладая набором уникальных свойств, могут использоваться более оптимально, в ряде случаев полностью исключая применение батарей.

1. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.

1.1. Первичные источники энергии.

Наиболее типичными представителями первичных альтернативных источников энергии, промышленно освоенных к настоящему времени являются:

- солнечные элементы (фотопреобразователи);
- ветрогенераторные установки;
- малые гидротурбины.

Эти системы непосредственно получают энергию от природных сред, в отличие от других многоступенчатых источников преобразования энергии, к примеру: биогаз, топливные элементы. Такая близость к природным процессам определяет и сильную зависимость от их флюктуации. Непостоянство солнечной активности, интенсивности и продолжительности ветра и т.д. вызывают нестабильный выход электроэнергии у вышеперечисленных первичных источников. Не только в течение дня, но и в течение часа и даже минут, выходная характеристика по току и напряжению может меняться в диапазоне $\pm 40\%$! Естественно, никакой потребитель не сможет работать и использовать энергию первичного источника при непосредственном присоединении к нему. Поэтому общепринято использование вторичного источника энергии, являющегося буфером между первичным источником и потребителем.

1.2. Вторичные источники энергии.

Наиболее технически развитым и имеющим промышленный выпуск источником энергии являются аккумуляторные батареи (АКБ). В редких случаях используются электролизные ячейки с хранением газов и последующим их использованием в топливных элементах [1]. Имеются также попытки запасания потенциальной энергии в виде сжатого воздуха с использованием его посредством пневмотурбин [2] [3].

Для вторичных источников тока альтернативной энергетики в основном применяются две электрохимические системы традиционных АКБ: свинцово-кислотная и никель-кадмиевая. Размер вторичного источника сильно варьируется и, в зависимости от конкретного объекта, может хранить энергию для потребления в течение одного или десятков часов.

АКБ в основном удовлетворяют требования потребителей при долгом расходовании/запасании энергии. Однако им присущ ряд недостатков, снижающих эффективность их применения и увеличивающих эксплуатационные издержки:

а) при кратковременном падении напряжения на входе в АКБ она перестает заряжаться и не может запастись энергией в низковольтном диапазоне;

б) при кратковременном превышении напряжения на входе происходит либо перезаряд батареи, либо автоматика контроля отключает ее с заряда. При этом входящая энергия рассеивается на нагрузочных резисторах, если потребителю она не требуется;

в) из-за высокой инерции электрохимических реакций АКБ, она не может принять и хранить мощные кратковременные зарядные импульсы (секунды, к примеру – порыв ветра);

г) при кратковременной перегрузке выходящего фидера АКБ происходит провал напряжения локальной сети или изменение частоты за выходящим генератором сети переменного тока;

д) автоматика контроля стоит значительных средств по отношению к стоимости АКБ, а упрощение автоматики ведет к увеличенным затратам на обслуживание АКБ (доливка электролита, проверка напряжения каждого элемента и др.).

Таким образом, несмотря на широкую применяемость АКБ в альтернативной энергетике, они не являются оптимальным решением. Непостоянство зарядного тока и напряжения на входе в АКБ, нерегулярные циклы заряд-разряд, вероятность перезаряда или переразряда, снижают эффективный срок службы вторичного источника тока и не обеспечивают нормальную эксплуатацию в течение многих лет.

1.3. Электрохимический конденсатор – вторичный источник энергии для альтернативной энергетике и качества электроэнергии.

Вспомним место электрохимических конденсаторов (ЭК) среди традиционных источников тока, базируясь на основных потребительских качествах (таблица 1) [4].

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ	Традиционные конденсаторы	Электрохимические конденсаторы	Батареи
1. Быстродействие (постоянная времени разряда)	Очень высокое (RC: 0,005-0,3 сек)	Очень высокое (RC: 0,07-0,5 сек)	Очень медленное (RC: тысячи секунд)
2. Удельная энергия	Очень низкая ($\approx 0,2$ кДж/кг)	Приемлемая, средняя (1-30 кДж/кг)	Высокая (>100 кДж/кг)
3. Удельная мощность	Очень высокая в импульсе	Очень высокая (5-20 кВт/кг)	Очень низкая (<1 кВт/кг)
4. Срок службы	Высокий (миллионы циклов заряд-разряд)	Высокий (миллионы циклов заряд-разряд)	Низкий (тысячи циклов заряд-разряд)

Из таблицы видно, что электрохимические конденсаторы занимают промежуточное положение между традиционными конденсаторами и АКБ, имея преимущественные показатели тех и других.

Рассмотрим возможности ЭК применительно к альтернативной энергетике и качеству электроэнергии по сравнению с АКБ:

а) очень низкое внутреннее сопротивление ЭК (малое значение RC) позволяет с КПД более 90% «подхватывать» и запасать энергию мощных импульсов по току и напряжению с длительностью 100 микросекунд - сотни секунд;

б) быстродействие ЭК дает возможность выхода на максимальную мощность (нагрузку) в течение 5-20 микросекунд! [5] Таким образом, в переходных процессах перегрузки сети не будет провалов тока и напряжения, а также смещения фаз выходного генератора переменного тока;

в) электрохимические конденсаторы не зависят от нерегулярности зарядов и разрядов, не имеют «эффекта памяти», допускают переразряд до переплюсовки и короткое замыкание без ухудшения параметров;

г) ЭК – герметичные устройства и являются интеграторами запасенного электричества, что значительно упрощает состав и алгоритм работы контроль-

ной автоматики. Более того, ЭК не требуют обслуживания при работе, что в совокупности практически исключает издержки эксплуатации;

д) срок службы ЭК значительно превосходит таковой у АКБ. Есть подтвержденные данные для конденсаторов ЭЛИТ – 25.000.000 циклов заряд-разряд при глубине 20%.

Перечислив сравнительные преимущества, не следует забывать и о недостатках, единственный из которых – низкая удельная энергия. Конденсаторные комплекты могут улучшать и поддерживать сеть в периоды повышенной востребованности, максимум в течение минут. Таким образом, нельзя исключить использование АКБ для систем, зависящих от времени суток – фотовольтаика. Но и в этом случае применение ЭК экономически оправдано, т.к. исключаются «неприятности» переходных процессов как на входе так и на выходе АКБ. Улучшается режим эксплуатации АКБ и увеличивается её срок службы. Возможно также снижение установочной емкости АКБ за счет передачи «мощностных» функций на конденсаторный комплект.

Для других систем альтернативной энергетики (ветро и гидрогенераторы, топливные элементы) возможно полное исключение АКБ, как вторичного источника тока между первичным источником и потребителем [6].

Следует вкратце отметить и некоторые дополнительные преимущества ЭК:

- отсутствие электрохимических реакций на электродах ЭК с кинетической зависимостью, меньший эффект температурного влияния, позволяют эксплуатировать ЭК в более широких температурных пределах, не достижимых для АКБ;

- большинство ЭК не содержат токсичных компонентов в активных массах и электролитах (системы с водными растворами электролитов) и во время эксплуатации (и после) не выделяют в окружающую среду каких-либо веществ.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ В АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ.

Наиболее простая схема применения ЭК в системах с первичным *фотоэлектрическим* источником и вторичной *низковольтной АКБ* приведена на Рис.1.

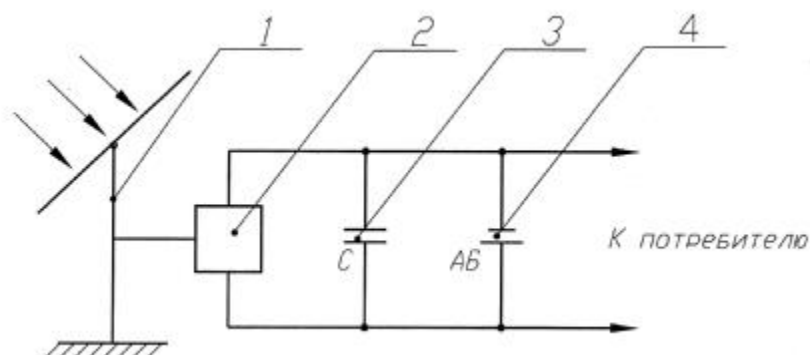


Рис.1. Принципиальная схема включения ЭК для стабилизации низковольтной сети.

1 – фотоприемник (солнечная панель); 2 – контрольное устройство;
3 – ЭК; 4 – аккумуляторная батарея.

Более комплексное использование ЭК в крупных высоковольтных сетях с потребителями переменного тока приведено на Рис.2.

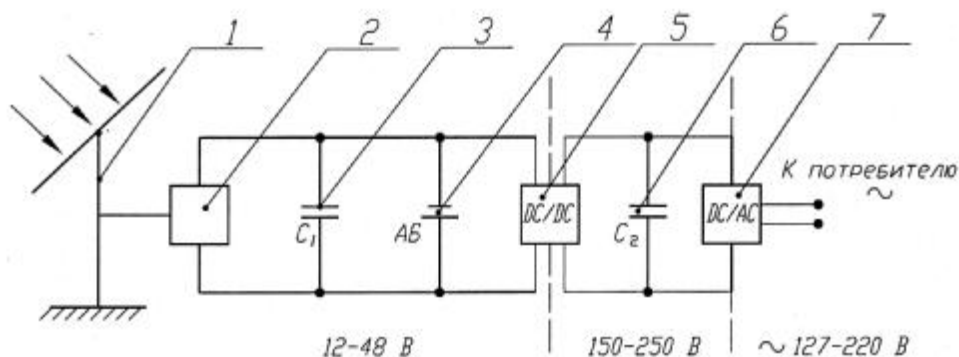


Рис.2. Принципиальная схема включения ЭК для стабилизации высоковольтной сети.

1 – фотоприемник (солнечная панель); 2 – контрольное устройство; 3 – ЭК; 4 – АКБ;
5 – DC/DC конвертер (постоянный ток); 6 – ЭК для стабилизации высоковольтной сети
потребителя; 7 – DC/AC конвертер (переменный ток).

Во всех этих применениях, Энергозапас ЭК рассчитывается исходя из покрытия 75-85% энергии, требуемой в высокомоощном разряде. Т.е. АКБ защищена от перегрузок и разряжается в длинном и среднем режимах. Кроме того, наличие высоковольтного конденсатора перед DC/AC конвертером улучшает качество электроэнергии в сети переменного тока у потребителя.

В объектах ветроэнергетики, конденсаторный комплект размещается между ветрогенератором и потребителем без использования АКБ. Возможны различные схемы, включая ветряки с генератором переменного тока, где ЭК поддерживает сеть через AC/DC – DC/AC преобразователи, работая в режиме on-line. Энергозапас ЭК во многом определяется мощностью ветрогенератора и сети которую он питает и варьируется от десятков килоджоулей до мегаджоулей.

Рассмотрим конкретный пример:

*Суперконденсаторный комплект мощностью 500 кВт
для ветроэнергетической установки.*

Исходные данные:

1. Максимальная мощность	500 кВт
2. Средняя мощность	200 кВт
3. Максимальное рабочее напряжение	800 В
4. Номинальное рабочее напряжение	600 В
5. Минимальное рабочее напряжение	400 В
6. Количество перегрузок по мощности в день	250
7. Температура эксплуатации	-25°C ... +50°C
8. Требуемое время поддержания ветрогенератора	4...7 сек.

Параметры конденсаторного комплекта:

1. Электрическая емкость	15,38 Ф
2. Полное внутреннее сопротивление	0,023 Ом
3. Полный Энергозапас	3,08 МДж
4. Энергия, отданная при разряде мощностью 200 кВт	1,75 МДж
5. Время разряда (200 кВт)	8,7 сек
6. Постоянная времени разряда (RC)	0,36 сек
7. Эффективность преобразования энергии	>97%
8. Пиковая мощность	4,2 МВт
9. Общий вес комплекта	2700 кг
10. Общий объем комплекта	1,7 м ³

Упрощенная схема подключения комплекта приведена на Рис.3.

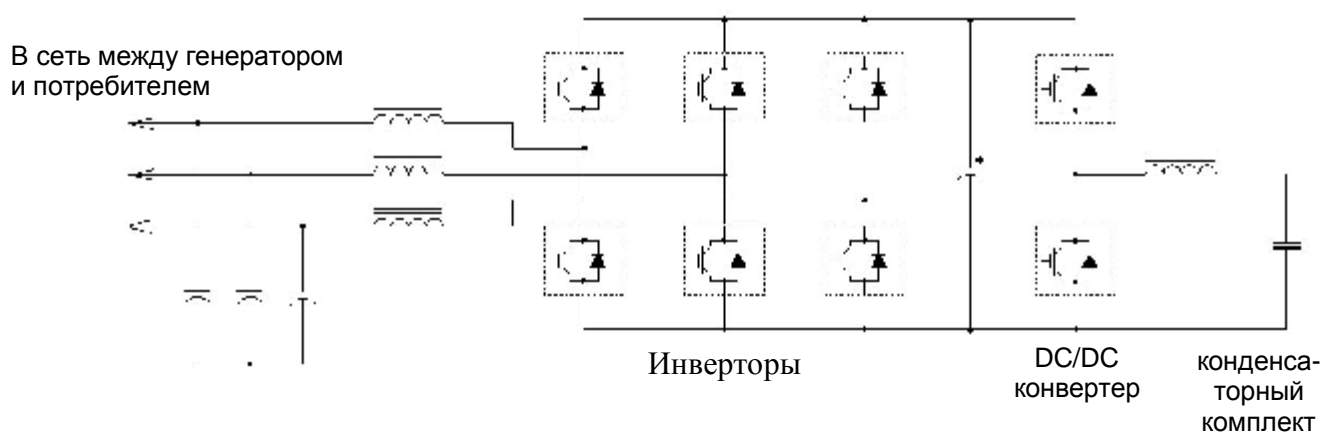


Рис. 3.

Конденсаторный комплект в этом случае эксплуатируется в нормальном недозаряженном состоянии. При малом расходе энергии в сети и кратковременном превышении входящего потока энергии от ветряка, комплект заряжается до максимальной степени заряда и хранит этот избыток до востребования. При перегрузке сети потребителя конденсаторный комплект обеспечивает переходные процессы, разряжаясь из точки среднего заряда или максимального заряда.

Анализируя исходные данные и параметры конденсаторного комплекта, очевидно, что ни один тип АКБ не сможет эффективно работать в таком широком диапазоне напряжений и при таком высоком напряжении. Кроме того, ни одна из возможных высоковольтных батарей не уместится в 1,7 м³ и не сможет обеспечить пиковую мощность 2,5 кВт/литр.

3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ В СИСТЕМАХ КАЧЕСТВА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.

3.1. Линейные системы бесперебойного электроснабжения в крупных промышленных сетях.

В таких системах комплекты ЭК работают как UPS короткого действия (до 1 мин.), одновременно снимая проблемы переходных процессов при перегрузке линий, кратковременной флюктуации тока, напряжения и частоты на входе и выходе.

Типовая схема онлайнной UPS короткого действия приведена на Рис.4.

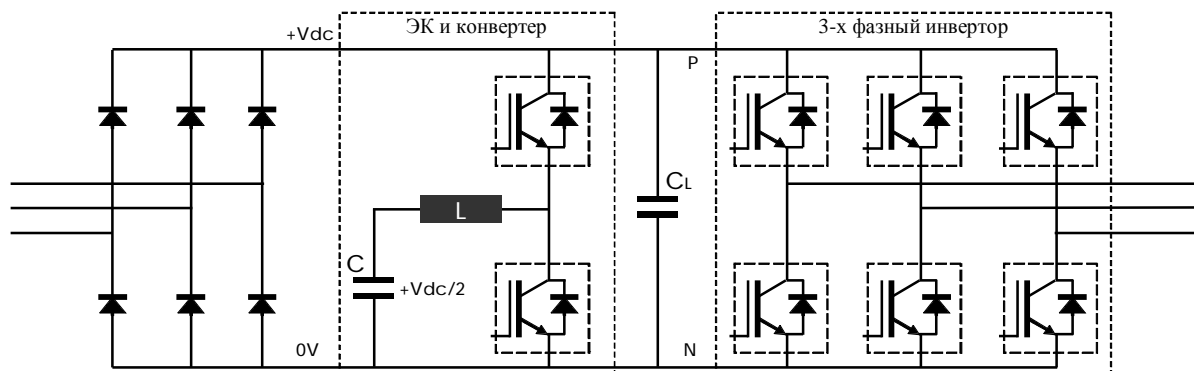


Рис.4.

Конкретный пример реализации UPS короткого действия – 10 кВт, 30 сек.:

Характеристики комплекта ЭК

1. Номинальное рабочее напряжение	200 В
2. Емкость	22, Ф
3. Внутреннее сопротивление	0,016 Ом
4. Энергозапас	457 кДж
5. Время разряда 200 В → 100 В, 10 кВт	33 сек.
6. Общий вес	180 кг
7. Общий объем	170 литров

Для сравнения, чтобы реализовать этот процесс с помощью свинцово-кислотных АКБ, необходимо установить 50 элементов с емкостью 150 А·ч. При удельной энергии стационарных АКБ – 30 Вт·час/кг, вес системы составит 500 кг вместо 180 кг ЭК. При этом также невозможно решить проблемы переходных процессов.

3.2. Модернизация статических компенсаторов на подстанциях высоковольтных ЛЭП.

Участившиеся случаи отказов в электроснабжении крупных регионов (Нью-Йорк-2003, Москва-2005) заставляют компании, торгующие электроэнергией, модернизировать свои подстанции. Основная цель – избежать лавинообразного отключения сети подстанций из-за кратковременных перегрузок ЛЭП.

Традиционно, статические компенсаторы только регулировали реактивную мощность, добиваясь минимизации сдвига угла фаз. При этом используют-

ся обычные конденсаторы, хорошо работающие на промышленной частоте (50, 60 Гц).

Однако STATCOM не может поддерживать ЛЭП в случае пропадания (≈ 100 мсек) напряжения в сети, или как-то компенсировать переходные процессы этого явления.

В последнее время определилась тенденция оснащения подстанций собственным источником тока для кратковременной подпитки сети. Тип источника тока – высокоемкие конденсаторы. Компенсационный запас 1...3 МДж, время компенсации ≈ 2 сек.

Разрабатываются два основных варианта компенсации:

а) Формирование синусоиды цикла кратковременным включением конденсаторов постоянного тока в разряд с меняющимся количеством подключаемых элементов.

Основная идеология и техническое воплощение приведены на Рис.5.

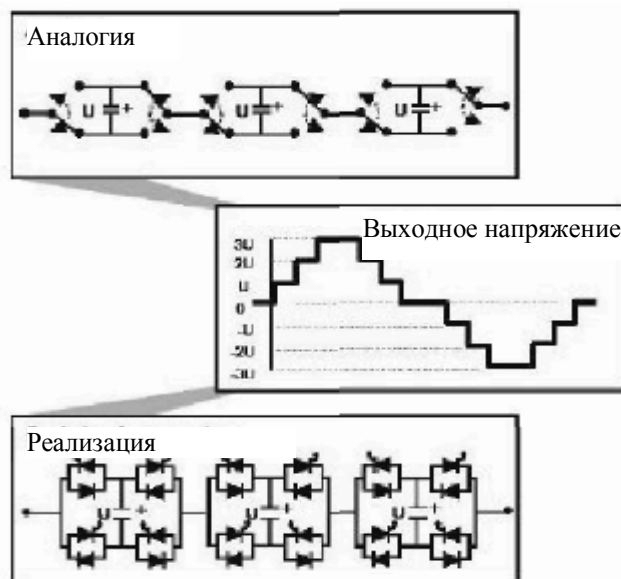


Рис.5.

Для реализации работы этой схемы потребуются ЭК с постоянной времени разряда < 10 мсек. Что вполне достижимо для ЭК систем с водным электролитом.

б) Параллельное включение конденсаторного комплекта через повышающий DC/DC конвертер и затем через DC/AC инвертер. Практически – это схема UPS короткого действия, описанная в разделе 3.1 настоящей статьи. Исключение только в том, что включение осуществляется не в режиме он-лайн через сеть, а параллельно ей. Конкретный пример реализации может быть таким же, как и описание в разделе 3.1. Необходимый Энергозапас и рабочее напряжение собственного источника подстанции набираются последовательно-параллельным соединением комплектов ЭК или модулей ЭК, входящих в их состав.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Электрохимические конденсаторы могут эффективно использоваться в альтернативной энергетике, полностью заменяя аккумуляторные батареи в системах, не зависящих от времени суток (ветро и гидроэнергетика, топливные элементы ...). При этом, дополнительно решаются проблемы качественного энергоснабжения из-за исключения переходных процессов при перегрузке сетей.

2. Электрохимические конденсаторы могут эффективно использоваться в системах повышения качества энергии и её распределения. При этом решаются проблемы устойчивости подстанций ЛЭП к кратковременным перегрузкам и снижается вероятность лавинообразного отключения ЛЭП.

Таким образом, везде, где имеются нестабильные потоки энергии, ЭК может решить эти проблемы. «Большие» суперконденсаторные комплекты обеспечивают стабильную мощность от 30 микросекунд до десятков и сотен секунд в периоды нестабильности или пропадания напряжения в сети.

Литература.

1. PEM Electrolyzers For Pure Gases Production, S. Grigoriev, in Proceedings of “Renewable Energy and Energy Efficiency Commercialization Conference”, Denver, CO, March 31–April 1.
2. Not Just Hot Air? A. Price in “Batteries + Energy Storage Technologies”, Winter 2004 (ISSN 1741-8666).
3. TEX, The Battery-Free, Flywheel-Expansion Turbine Hybrid Energy Storage System (Active Power), J. Sears, in Proceedings INTELEC, 26th Annual Meeting, Chicago, IL, September 2004.
4. Application of Large Supercapacitors Today and Tomorrow, A.I. Belyakov, Proceedings of “Power Systems World – 98”, November 7-13, 1998, Santa Clara, USA (ISBN 0931033-72-1).
5. Transient Processes in High-Power Discharge of Electrochemical Capacitors, A.I. Belyakov, Presented at the 13th International Seminar on DLC and Similar Energy Storage Devices, Deerfield Beach, FL, December 8-10, 2003.
6. Electrochemical Capacitors For Primary Renewable Power Sources, A. Belyakov, in Proceedings of “Renewable Energy and Energy Efficiency Commercialization Conference”, Denver, CO, March 31–April 1.