

# Борьба с резонансом

Предотвращение феррорезонанса в высоковольтных трансформаторах напряжения

Войцех Пясецкий, Марек Флорковский, Марек Фульчик, Пентти Махонен, Мариуш Люто, Вьеслав Новак, Отто Прайсс

Каждому инженеру знакомо явление резонанса. Без него не было бы музыкальных инструментов, радиосвязи, а множество природных явлений – от космического до субатомного масштаба – просто не имело бы места. Проявления резонанса не всегда благоприятны: колебания могут достичь такой амплитуды, на которую система не была рассчитана, что приведет к ее повреждению и разрушению. Эффективное разрушение Такомаского моста в США в 1940 г. произошло как раз из-за недемпфированного резонанса. Резонанс часто оказывается причиной отказов электронных систем.

К счастью, частоты, на которых возникает резонанс, можно определить на этапе проектирования. Однако расчет резонанса значительно усложняется при протекании нелинейных процессов. Когда магнитный поток в сердечнике (скажем, сердечнике трансформатора) превышает определенную величину, предсказать резонанс становится гораздо сложнее. Такая ситуация часто наблюдается при расчете трансформаторов напряжения (ТН), преобразующих высокое напряжение в низкое для использования в цепях измерений или защиты.

Номинальная мощность ТН обычно очень мала, поскольку такие трансформаторы предназначены для измерительных цепей, а не цепей питания. Номинальный ток в первичной обмотке такого трансформатора, как правило, составляет несколько миллиампер (при напряжении от единиц до десятков киловольт).

Так называемый феррорезонанс может возникнуть при включении ТН между фазой и землей в незаземленной сети. Сила протекающего при этом тока может превысить номинальный ток на несколько порядков, что грозит повреждением трансформатора.

**Явление феррорезонанса**

Резонанс в цепи, содержащей индуктивность и емкость, – хорошо известное физическое явление. Простейшие схемы, в которых реализуется это явление, – это параллельный и последовательный резонансные контуры (рис. 1).

Эквивалентный импеданс последовательного контура равен сумме импедансов отдельных элементов:

$$Z(\omega) = j\omega L - j\frac{1}{\omega C} + R_s$$

Эквивалентный адмитанс параллельного резонансного контура равен сумме адмитансов отдельных его элементов:

$$Y(\omega) = j\omega C - j\frac{1}{\omega L} + \frac{1}{R_p}$$

Резонансная угловая частота в обоих случаях равна

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

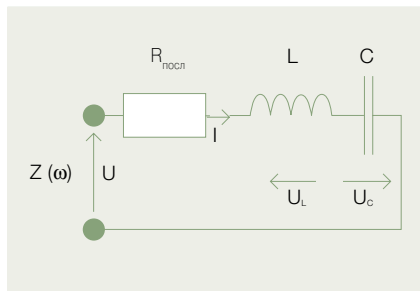
При этой или близкой к ней частоте в последовательном контуре напряжение на емкости или индуктивности может достичь величины, существенно превышающей напряжение источника. В параллельном контуре подобным же образом усиливаются токи через указанные компоненты. Столь большие токи или напряжения могут привести к повреждению оборудования, если для предотвращения этого не предпринять специальных мер.

При известных величинах L и C резонансную частоту можно рассчитать. Избежать опасных резонансных явлений можно, отстроившись от частот питающего напряжения с определенным запасом.

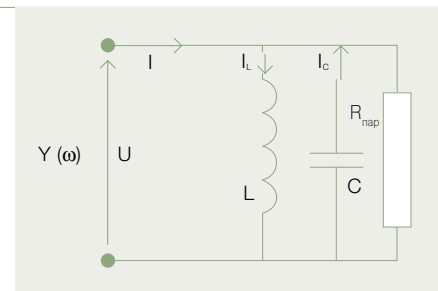
В случае же феррорезонанса резонансные частоты спрогнозировать сложнее. Это явление наблю-

**1** Последовательный и параллельный линейные резонансные контуры.

Последовательный резонансный контур



Параллельный резонансный контур



дается, когда магнитный сердечник индуктивного элемента достигает состояния насыщения, в котором зависимость магнитного потока от тока становится нелинейной (рис. 2). Вследствие такой нелинейности резонанс может возникать на разных частотах.

На практике феррорезонансные колебания инициируются при мгновенном насыщении сердечника индуктивного элемента в результате, например, операций по переключению. Последствия такого резонанса становятся еще более тяжелыми при недостаточном демпфировании.

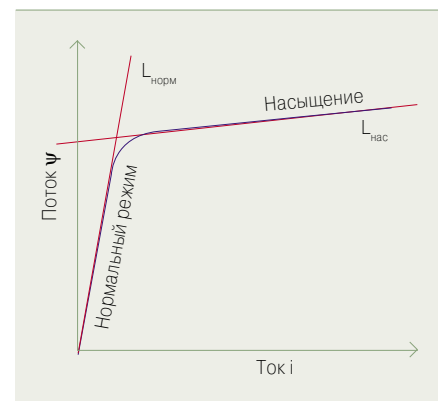
При феррорезонансе сила протекающего тока может превысить номинальный ток на несколько порядков, что грозит повреждением трансформатора.

Во многих случаях возникновения устойчивого резонанса, когда причиной является насыщение сердечника индуктивного элемента, некоторые узлы эквивалентной схемы сети не имеют гальванической связи с другими узлами (или связаны с ними через элементы с очень большим импедансом). Схема такой сети показана на рис. 3.

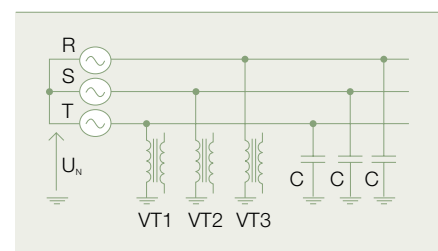
Хотя феррорезонанс может также возникать и в других ситуациях (например, вследствие емкостной связи между параллельными линиями, между ТН и внутренней емкостью силового трансформатора или из-за однофазного разрыва в сетях с заземленной нейтралью), конфигурация, показанная на рис. 3, соответствует типичной распределительной системе с изолированной нейтралью при использовании однополюсных ТН.

Несмотря на то, что первые публикации о явлении феррорезонанса появились в начале XX века, на сегодняшний день не было сформулировано ни одного надежного критерия оценки риска феррорезонанса. Не существует и универсального

**2** Нелинейная характеристика индуктивного элемента с насыщаемым сердечником.



**3** Высоковольтная сеть с изолированной нейтралью, в которой три однофазных ТН включены между фазой и землей.



**4** Последствия феррорезонанса в незаземленном ТН.



## Надежность сети

метода борьбы с этим явлением, кроме включения гасящего резистора в разомкнутый треугольник, образованный вспомогательными обмотками трех отдельных трансформаторов напряжения.

Компактная конструкция современных трансформаторов напряжения и применение в них высококачественных материалов (обуславливающих малые потери) осложняет демпфирование.

### Опасность для оборудования

В нормальных условиях работы токи в первичных обмотках высоковольтных ТН обычно гораздо меньше 10 мА. При возникновении феррорезонанса сердечник ТН работает в области глубокого насыщения, ток первичной обмотки при этом может достигнуть нескольких ампер. Превышение тока в условиях феррорезонанса на два порядка относительно нормальных значений при отсутствии достаточного демпфирования ведет к тепловому повреждению первичной обмотки (рис. 4).

Компактная конструкция современных трансформаторов напряжения и применение в них высококачественных материалов (обуславливающих малые потери) осложняет демпфирование.

Резистивная нагрузка должна иметь малое сопротивление для рассеяния достаточного количества энергии колебаний. Слишком малое сопротивление, однако, ведет к слишком большому потреблению мощности от ТН при возникновении продолжительного напряжения нулевой последовательности (например, вследствие неустраненного вовремя замыкания на землю) и приводит к тепловой перегрузке ТН. Следовательно, очень важным оказывается правильный подбор величины сопротивления.

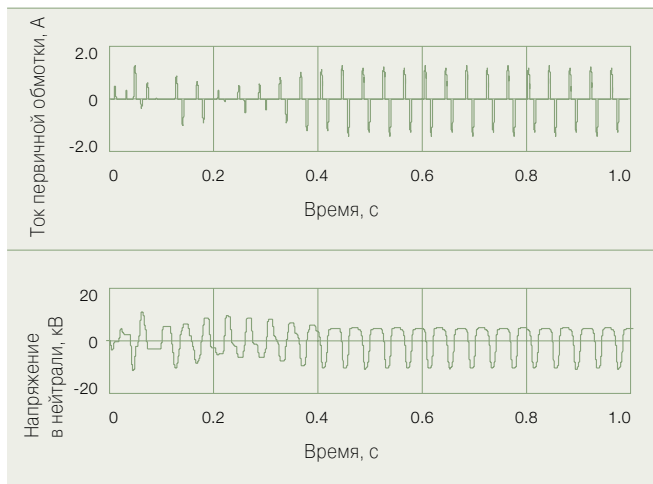
### Анализ потенциального феррорезонанса

Для анализа состояний сети, при которых в ТН определенного типа возникает феррорезонанс,

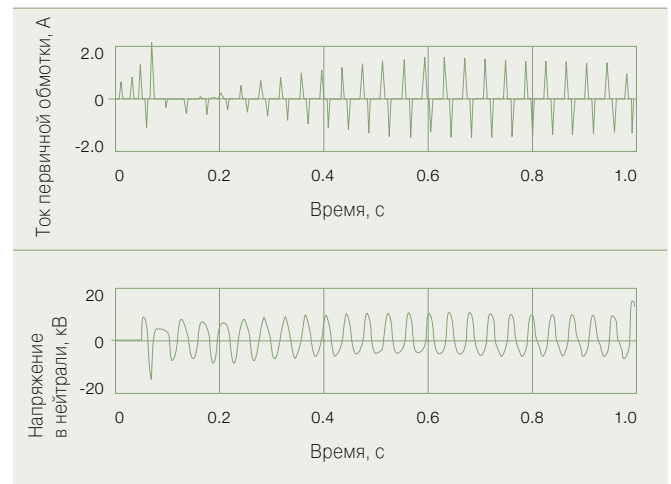
5 Полученные экспериментально и в результате моделирования токи в первичной обмотке и напряжения нейтрали ТН при значении емкости С из опасного диапазона.

Напряжение системы 20 кВ/ $\sqrt{3}$ , С = 70 нФ/фаза

Модель



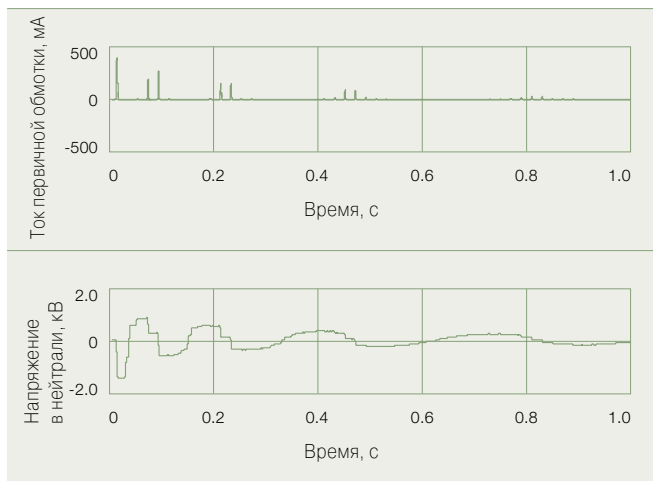
Эксперимент



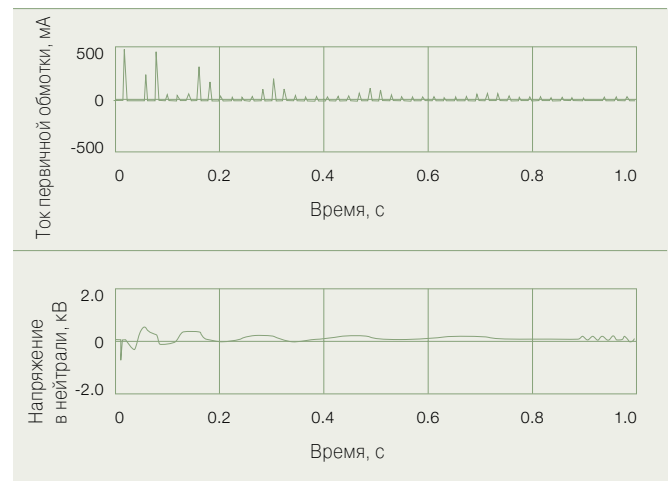
6 Полученные экспериментально и в результате моделирования токи в первичной обмотке и напряжения нейтрали ТН при значении С выше опасного диапазона.

Напряжение системы 20 кВ/ $\sqrt{3}$ , С = 240 нФ/фаза

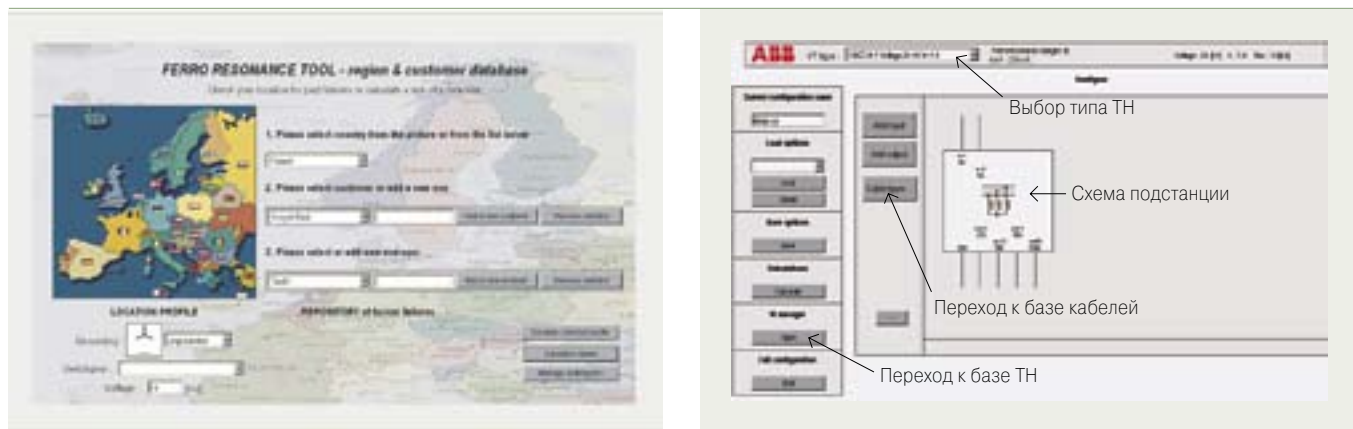
Модель



Эксперимент



7 Программное обеспечение FerroTool для оценки риска феррорезонанса в отдельно взятой конфигурации сеть-ТН.



было проведено моделирование с помощью специализированного ПО, позволяющего моделировать переходные процессы (PSPice, ATP/EMTP). Моделирование переходных характеристик при коммутационных операциях связано с разработкой моделей различных типов ТН на основе магнитных параметров.

Программное обеспечение FerroTool содержит базу данных, в которой типам ТН сопоставлены параметры, включая опасный диапазон емкостей и рекомендуемые величины сопротивления гасящих резисторов.

Эти модели затем включались в эквивалентную модель сети с незаземленным источником напряжения и емкостями, включенными между фазами и землей. Для определения диапазона емкостей, при которых может возникнуть опасный феррорезонанс, был проведен анализ наихудшей ситуации с разгруженной сетью. Включение в модели вспомогательных обмоток и гасящих резисторов позволило оценить оптимальные значения сопротивления.

Результаты моделирования были подвергнуты экспериментальной проверке. На рис. 5 изображен отклик системы на коммутационные операции с феррорезонансными колебаниями, а на рис. 6 – без них.

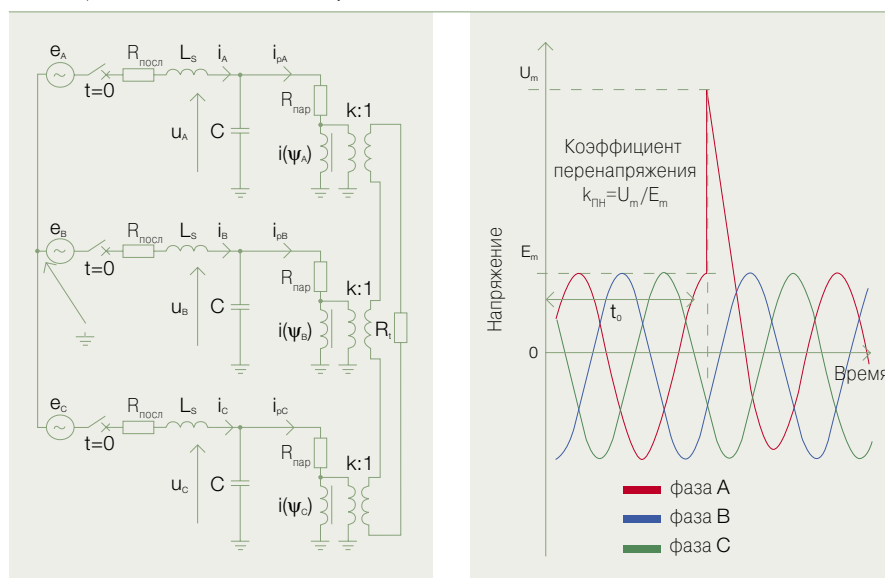
**FerroTool и FerroSim**

Моделирование позволило обозначить опасный диапазон емкости и определить максимальную величину гасящего сопротивления для различ-

ных типов ТН и уровней напряжения. Для того чтобы в полной мере использовать полученные результаты на практике, были разработаны программные средства для быстрого выявления потенциальной опасности феррорезонанса. Программное обеспечение FerroTool (рис. 7) содержит базу данных, в которой типам ТН сопоставлены параметры, включая опасный диапазон емкостей и рекомендуемые величины сопротивления гасящих резисторов. Для быстрого анализа риска возникновения феррорезонанса программа рассчитывает эквивалентные емкости подстанций на основе характеристик линий.

Результаты компьютерного моделирования и экспериментов указывают на то, что во многих случаях сопротивление, необходимое для подавления феррорезонансных колебаний, очень мало. Такое сопротивление приведет к потреблению слишком большого тока от ТН в случае асимметрии сети.

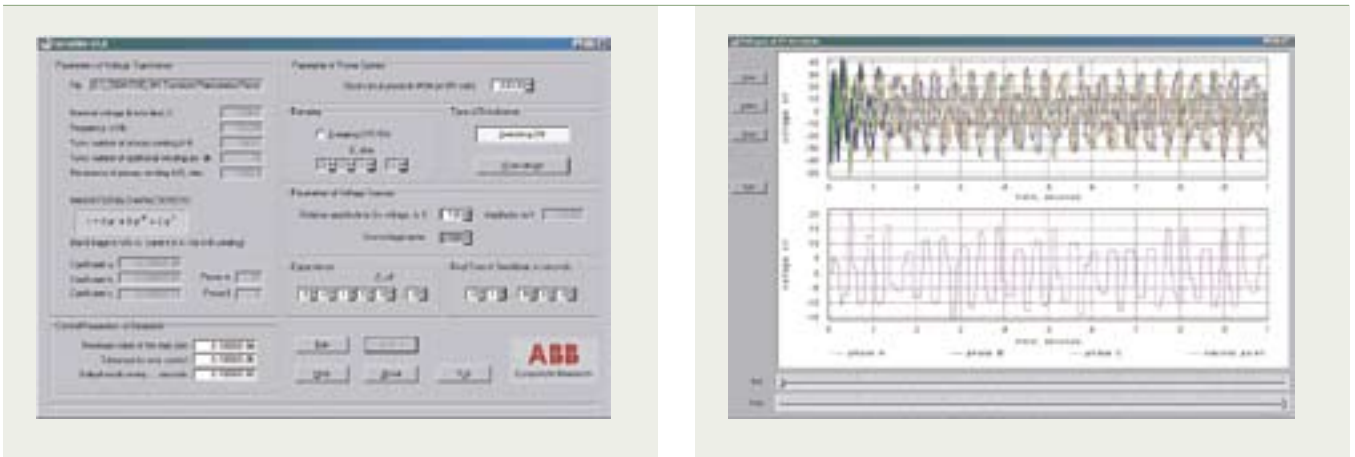
8 Фиксированная модель цепи и возбуждающее воздействие.



Для ПО FerroTool имеется специализированное вспомогательное средство FerroSim, позволяющее моделировать реакцию сети на переходные процессы при коммутационных операциях (рис. 8). Поскольку топология сети задана жестко, интерфейс пользователя удалось сделать очень простым (рис. 9).

## Надежность сети

9 Интерфейс пользователя программы FerroSim и пример выдачи результатов с указанием тока в первичной обмотке ТН и напряжения нейтрали.



### SmartLoad™: новый принцип борьбы с феррорезонансом

Результаты компьютерного моделирования и экспериментов указывают на то, что во многих случаях сопротивление, необходимое для подавления феррорезонансных колебаний, очень мало (<20 Ом). Такое сопротивление приведет к потреблению слишком большого тока от ТН в случае асимметрии сети. Специалистами АББ был разработан уникальный новый подход к рассматриваемой задаче: вместо обычного линейного резистора устанавливается двухполюсный элемент под названием SmartLoad™.

Прибор SmartLoad™ защищает ТН от тепловой перегрузки, он может быть использован для защиты практически любого высоковольтного трансформатора напряжения, стандартизованного по МЭК.

При возникновении напряжения нулевой последовательности, вследствие естественного небаланса в нормальном режиме работы, устройство действует как резистор с очень большим сопротивлением и не потребляет мощность от ТН. Когда же напряжение нулевой по-

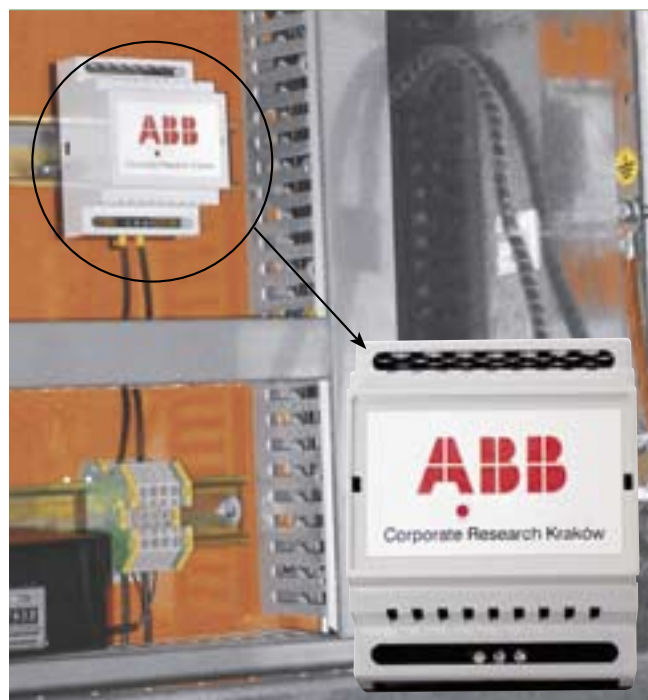
следовательности превышает заданные пределы, сопротивление прибора падает в достаточной мере, чтобы погасить колебания за небольшое число периодов. Было разработано устройство, которое эффективно подавляет феррорезонансные колебания без перегрузки ТН. Устройство отличается компактностью и может быть установлено на стандартную DIN-рейку в шкаф вторичных цепей (рис. 10).

#### Выводы

Трансформаторы напряжения, работающие в сетях с изолированной нейтралью, всегда требуют защиты от феррорезонанса. Амплитуда феррорезонансных колебаний, превосходящая

номинальное напряжение на несколько порядков, создаст серьезную угрозу трансформаторам. Резистивное демпфирование не всегда возможно, поскольку необходимое для него малое сопротивление приводит к перегрузке ТН. Новое решение, предложенное компанией АББ – это саморегулирующаяся нагрузка (SmartLoad™), сочетающая в себе преимущества резисторов с разным сопротивлением. Благодаря тому что прибор SmartLoad™ практически исключает риск тепловой перегрузки ТН в случае продолжительных аварийных ситуаций в системе, он может быть использован для защиты практически любого высоковольтного трансформатора напряжения, стандартизованного по МЭК.

10 Экспериментальная система с прибором SmartLoad.



**В. Пясецкий, М. Флорковский  
М. Фульчик**

ABB Corporate Research  
Краков, Польша  
wojciech.piasecki@pl.abb.com  
marek.florkowski@pl.abb.com  
marek.fulczyk@pl.abb.com

**Мариуш Люто**

ABB Medium Voltage  
Пшаснич, Польша  
mariusz.luto@pl.abb.com

**Пентти Махонен**

ABB Medium Voltage  
Вааса, Финляндия  
pentti.mahonen@fi.abb.com

**Отто Прайсс**

ABB Corporate Research  
Баден, Швейцария  
otto.preiss@ch.abb.com

**Вьеслав Новак**

Университет науки и техники  
Краков, Польша