

Д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ, к. т. н. В. А. ПАЛАГИН,
В. А. МАКАРЕНКО

Украина, Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
E-mail: zygin@kture.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
08.01 2002 г.

Оппоненты
д. т. н. Б. А. ЯКИМОВИЧ (ИГТУ, г. Ижевск),
д. т. н. Ю. А. ДОЛГОВ
(ПТУ им. Т. Г. Шевченко, г. Тирасполь)

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На примере процесса термообработки толстопленочных микросборок показано применение теории решений Байеса для проектирования технологии.

Цель поиска решения в задачах автоматизированного проектирования технологических процессов состоит в получении такого варианта его реализации, который был бы определен с достаточными для практического применения условиями и был бы по определенному критерию лучшим из рассматриваемых.

Сравнение возможных вариантов технологического процесса может выполняться различными математическими методами: с использованием марковских процессов с доходами [1], байесовских статистических решений [2], теории систем массового обслуживания [3], операторными методами [4] и многими другими [5], учитывающими те или иные характеристики разрабатываемых технологических процессов.

В настоящей работе предложен метод выбора лучшего варианта по критерию минимальной стоимости для процесса вжигания пленочных элементов (словес) толстопленочных микросборок с использованием байесовских решений.

В теоретико-множественном представлении процесс отыскания лучшего решения заключается в нахождении на множестве всех возможных решений A пересечения рассматриваемого разработчиком подмножества решений Y и подмножества Θ , характеризующегося минимальными стоимостями технологического процесса (ТП).

Модель процесса основана на байесовой теории решений и позволяет охарактеризовать область пересечений $Y \cap \Theta$ путем "выворачивания" деревьев решений [6, с. 39] по априорным экспертным оценкам дискретных распределений стоимостей разработки. Уточнение этих распределений при получении конкретных стоимостей экспериментальных данных на определенных этапах разработки производится по формуле Байеса.

Последовательность этапов работ, в результате выполнения которых получается наилучшее решение на момент оценки всей имеющейся информации, выглядит следующим образом:

- составление априорных оценок подмножества Y ;
- преобразование априорных оценок в свойства вычислительной сети;
- построение дерева решений;
- расчет ожидаемой выгоды для всех операций дерева;
- уточнение априорных оценок и усечение неперспективных;
- наилучший вариант.

Процесс поиска такого решения осуществляется в виде последовательности расчетных и (или) физических "экспериментов", т. е. действий, в которых приобретает информация о природе возможных решений.

Для иллюстрации работы разработанной модели рассмотрим представленную в виде дерева решений (рис. 1) задачу выбора лучшего варианта ТП вжигания толстопленочных микросборок по критерию затрат на разных методах вжигания, описанных в работах [7—9], и разных установок вжигания.

Исходные данные для расчетов представляются в виде экспертных оценок распределений вероятностей получения дискретных значений стоимости реализации ТП — $p(y)$ (рис. 2, а). Также в предположении наблюдения каждого из дискретных значений y_i

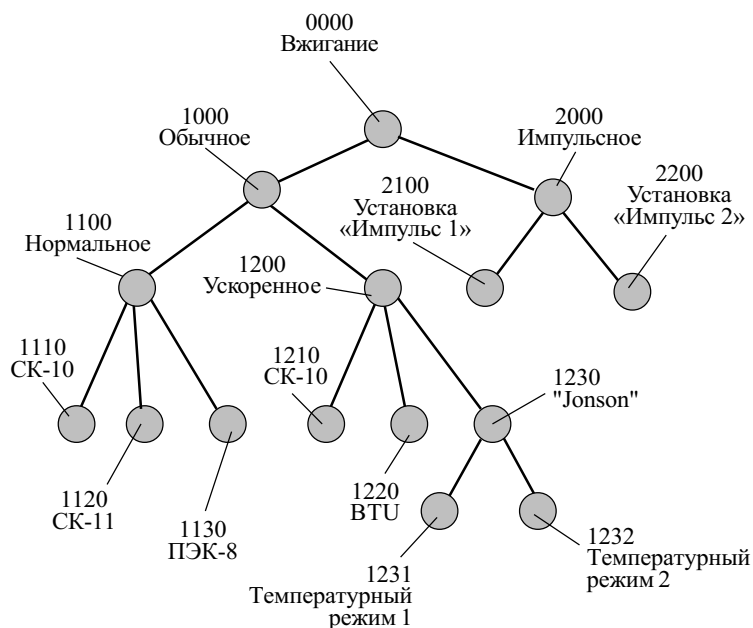


Рис. 1. Пример построения дерева решений

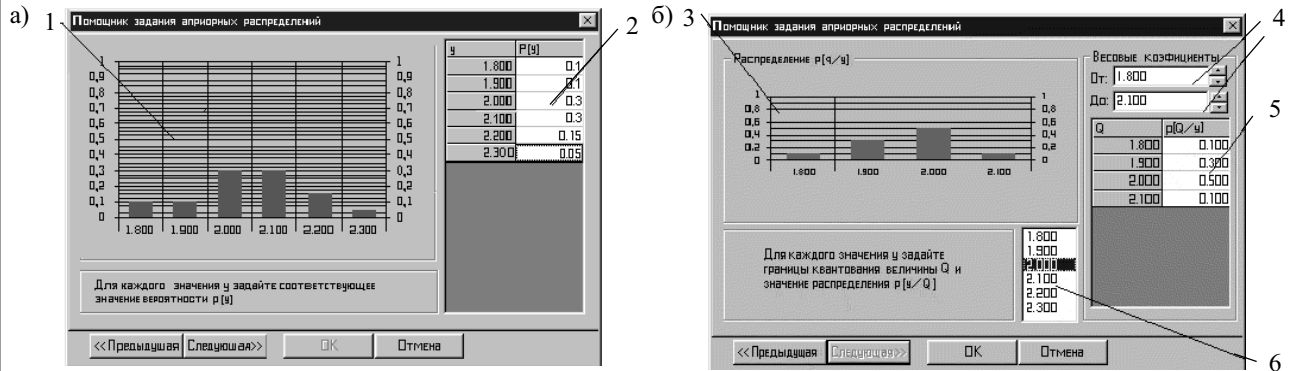


Рис. 2. Окна "помощника" задания априорных распределений

а) окно задания распределения $p(y)$: 1 — гистограмма распределения $p(y)$; 2 — таблица ввода дискретных значений $p(y)$; б) окно задания априорного распределения $p(\theta/y)$: 3 — гистограмма распределения $p(\theta/y)$; 4 — поля ввода границ диапазона условного распределения $p(\theta/y)$; 5 — таблица ввода дискретных значений $p(\theta/y)$; 6 — поле выбора значений y , для которых задается распределение $p(\theta/y)$

проектировщику необходимо задать распределение условных вероятностей получения минимальных стоимостей $p(\theta/y_j)$ (рис. 2, б). Эти оценки относятся ко всему рассматриваемому подмножеству вариантов ТП — Y , которому на дереве решений соответствует вершина с индексом 0000.

Вершины дерева представляют собой, согласно терминологии [2], операции, а ребра — операторы. Операция — решение либо множество решений в n -мерном пространстве решений. Оператор — множество процедур, применяемых к какой-либо операции, чтобы произвести другую операцию, более низкого уровня, со стоимостью y и вероятностью ее наблюдения $P_{ij}(y)$.

Вершина дерева 0000 представляет "универсальную" операцию, т. е. множество всех возможных решений, включая "нулевую" операцию, представляющую собой отсутствие решения. Операции могут быть разделены на "неосновные", т. е. операции, определяющие перспективную зону поиска решений, и "основные" — операции самого низкого уровня, представляющие конкретные решения в рамках этой зоны.

Преобразование исходных данных $p(y)$ и $p(\theta/y)$ в свойства вычислительной сети заключается в нахождении распределений $p(\theta)$ и $p(y/\theta)$ для универсальной операции — вершины $j=0000$. Данное преобразование выполняется с использованием свойства симметрии совместных вероятностей $p(y, \theta)$ в отношении элементов y и θ , которые справедливы для каждой операции j дерева.

$$p(y, \theta) = p(y)p(\theta/y) = p(\theta)p(y/\theta). \quad (1)$$

Распределение минимальных стоимостей $P_j(\theta)$ можно рассматривать как свойство операции j . Штрих в обозначении вероятности обозначает априорное распределение.

Если на операцию j воздействовать оператором уровня $i - e_{ij}(y/\theta)$ (произвести эксперимент e_{ij}), то получим распределение $P_{ij}(y)$ для операции k более низкого уровня иерархии ($k \in j$), т. е. свойства вершин определяются свойствами включающих операций и возможностями операторов, соединяющих их. Расчеты ведутся по формулам

$$P_{ij}(y) = \int p_i(y/\Theta) p_j(\Theta) d\Theta \quad (2)$$

$$p(\Theta) = \int P_{ij}(\Theta, y) dy; \quad (3)$$

$$p(y/\Theta) = P_{ij}(\Theta, y) / p(\Theta). \quad (4)$$

Прямое вычисление $p(y/\theta)$ по формуле (2) дает ненормированное значение условных вероятностей, характеризующих оператор, поэтому полученные априорные распределения должны пройти этап нормализации. Для нормирования введем вспомогательную переменную $m = y - \theta$, характеризующую величину смещения минимальных значений стоимости θ от наблюдаемого в эксперименте результата, и функцию

$$p(m) = \sum_{\Theta} p(\Theta, y = m + \Theta). \text{ Распределение } p(m) \text{ может}$$

быть принято за вероятность $p(y/\theta)$, и оно обеспечивает нормирование.

На следующем этапе проектировщик представляет картину возможных решений, стараясь наиболее широко и полно представить варианты возможных решений с подробной конкретизацией (см. рис. 1). Такая древовидная схема позволяет наглядно представить важные для разработчика аспекты "истории" решения задачи по выбору наилучшего ТП и определить:

- а) число операций, которые генерируются и просчитываются;
- б) последовательность, в которой эти операции выполняются;
- в) их относительные уровни, т. е. с помощью каких операторов они производятся;
- г) для каждой операции ее общую "генеалогию", т. е. в какие операции она включена и какие операции сама включает.

Если в эксперименте была получена конкретная стоимость y^* для какой-либо основной операции, происходит уточнение априорных оценок по формуле Байеса.

Для всех операций k , включающих данную операцию k^* , апостериорное значение —

$$p''(\Theta/y^*) = \frac{p'(\Theta) p_i(y^*/\Theta)}{\int p'(\Theta) p_i(y^*/\Theta) d\Theta}. \quad (5)$$

Для всех других операций распределения вероятностей остаются без изменений.

Таким образом, при получении конкретной стоимости априорные значения в распределении θ уточняются вверх по иерархии, не затрагивая остальных ветвей дерева решений.

Чтобы значительно уменьшить количество рассматриваемых вариантов, необходимо введение аппроксимаций, смысл которых состоит в "усечении" ветвей дерева решений, т. е. в определении точки, в которой можно прекратить рассмотрение дальнейшей последовательности процесса в связи с тем, что выполненная серия экспериментов уже дала достаточно информации, и оптимальным решением является прекращение дальнейшего анализа. Это позволяет исключить из дальнейшего рассмотрения целые "поддеревья". Правила, используемые для этого, называются правилами "усечения".

Еще один вопрос связан с необходимостью определения некоторого эквивалентного значения для граничной точки, которое представляло бы величину ожидаемой выгоды от использования оптимальной стратегии на отсеченной части дерева.

После проведения необходимых уточнений распределений по результатам эксперимента проектировщик выберет среди всех ранее полученных операций ту, которая связана с наименьшими затратами — R . Выполнять ли еще один дополнительный эксперимент для наблюдения результата y^{**} , зависит от ожидаемой выгоды получения операции со стоимостью $y^{**} < R$. "Выгода" будет оценкой такой операции. Стоимость операции будет равна меньшему из чисел R и y^* . Стоимость результата определится из выражения

$$u(e_{ij}, y^{**}) = c + \min(R, y^{**}), \quad (6)$$

где c — стоимость эксперимента.

Для вычисления ожидаемых затрат в указанном эксперименте используем величину $P_{ij}(y)$; тогда

$$u^*(e_{ij}) = \int_0^{\infty} P_{ij}(y) u(e_{ij}, y) dy = c + \int_0^R y P_{ij}(y) dy + R \int_R^{\infty} P_{ij}(y) dy. \quad (7)$$

При окончании процесса в данной точке соответствующие затраты будут равны:

$$u^*(e_0) = R.$$

Проектировщику следует проводить эксперимент e_{ij} вместо окончания процесса только если

$$\int_0^R (R - y) P_{ij}(y) dy > c. \quad (8)$$

Таким образом, если ожидаемое сокращение затрат при выборе наилучшего из найденных вариантов основных операций будет меньше либо равно стоимости проведения нерассмотренного эксперимента e_{ij} , он будет исключен из рассмотрения.

В процессе исследования было разработано Windows-приложение, позволяющее проверить эффективность данной теории. Для реализации данного приложения был применен объектно-ориентированный подход к программированию с использованием MS Visual C++ [10]. Процесс выбора наилучшего варианта разработки с помощью данного программного продукта прост и может контролироваться технологом на каждом этапе поиска.

Рассмотрим работу данной программы на примере задачи выбора лучшего технологического процесса вигания толстопленочных микросборок.

После задания диапазона значений стоимости y и шага квантования, влияющего на точность априорной оценки, технолог непосредственно переходит в окно "помощника", предназначенное для задания вероятностных оценок каждой дискретной стоимости данного диапазона (см. рис. 2, а). При вводе значений $p(y)$ для каждого дискретного y_i в таблицу ввода 2 разработчик может визуально контролировать вид и изменения распределения в гистограмме 1.

На следующем этапе технологу необходимо перейти в окно задания условных распределений $p(\theta/y)$ (см. рис. 2, б). Перебирая по очереди все дискретные значения y в списке 4, необходимо задать для каждого элемента этого списка границы распределения $p(\theta/y)$ в полях ввода 2 и значения условных вероятностей в таблице ввода 5. Аналогично предыдущему шагу, вид каждого из заданных распределений можно контролировать при помощи гистограммы 1.

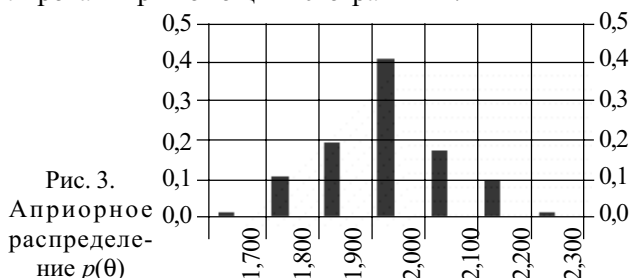


Рис. 3. Априорное распределение $p(\theta)$

После преобразования априорных распределений для универсальной операции в распределение $p(\theta)$ для этой операции и распределение $p(y/\theta)$ для оператора, свойства операций более низкого уровня в иерархии дерева решений формально порождаются (определяются) операциями более высокого уровня, и технолог должен развернуть дерево решений ТП, начиная с верхнего уровня (см. рис. 3). Разработанное программное приложение позволяет строить дерево решений с присвоением индексов для каждой операции (см. рис. 4). Так, распределение $p(\theta)$ универсаль-

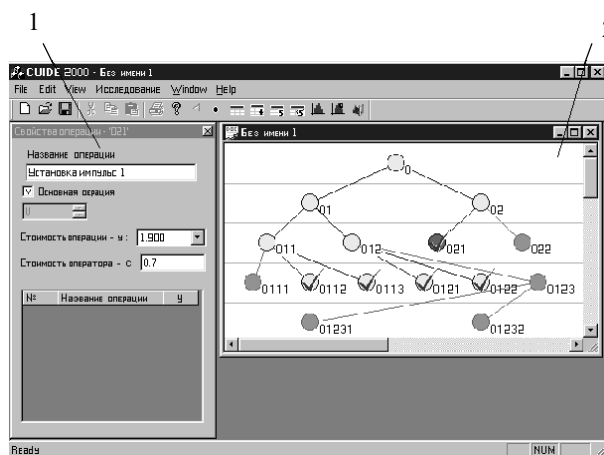


Рис. 4. Основные окна приложения:
1 — окно задания свойств операции; 2 — окно построения дерева решений
○ — рассмотренная операция; ● — наилучшая операция;
● — отсеченная операция

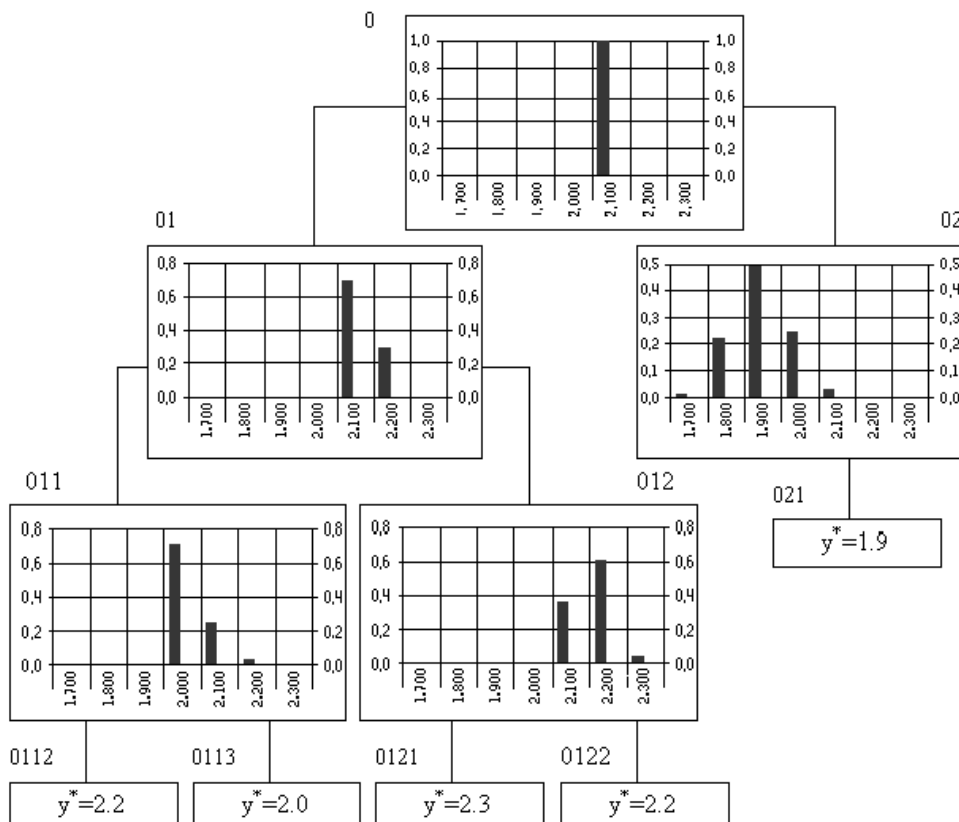


Рис. 5. Состояние распределений в узлах усеченного дерева решений

ной операции приписывается операциям j дерева до получения экспериментальных данных по какой-либо основной операции y^* (принцип транзитивности).

Основным методом вжигания слоев толсто пленочных микросборок, широко используемым промышленными предприятиями, является вжигание в многозонных конвейерных печах типа СК-10, СК-11, ПЭК-8, печей фирмы ВТУ и Jonson, обеспечивающих поддержание температуры в зоне максимального нагрева с точностью 1...2 °С, ламинарный поток воздуха в муфеле печи, направленный встречно движению обжигаемых изделий, стабильную скорость движения конвейера, заданную скорость нагрева и охлаждения подложек. Длительность процесса вжигания каждого слоя многослойных коммутационных плат примерно равна 90...105 минутам [7]. Известны также работы по ускоренному вжиганию слоев микросборок [8], сокращающему время вжигания в 2—4 раза, а также по импульсному вжиганию за 90...20 секунд, уменьшающему длительность вжигания в 10—100 раз [9]. Исходя из возможных вариантов вжигания было построено дерево решений. Описание соответствий операций дерева решений и вариантов разработки приведено на рис. 1.

По мере получения конкретных стоимостей y^* в операциях 0112, 0113, 0121, 0122 и 021 априорные распределения минимальной стоимости θ были уточнены по формуле (5), а неперспективные варианты разработки дерева решений усечены. Состояние распределений в узлах усеченного дерева решений приведены на рис. 5, а изменение распределения $p(\theta)$ в универсальной операции — на графике рис. 6.

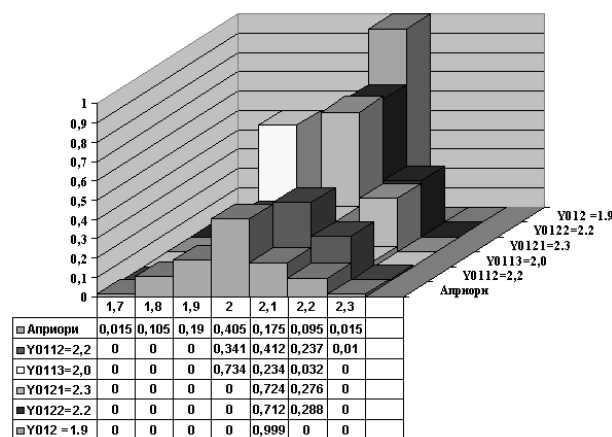


Рис. 6. График изменения распределения $p(\theta)$ в универсальной операции

Из полученных данных видно, что наилучшим вариантом разработки будет технологический процесс, определяющийся операцией 021, т. е. вжиганием импульсным методом на установке "Импульс 1", с наибольшей вероятностью получения минимальной стоимости $\theta=2,1$ тыс. грн.

Таким образом, предложенная методика позволяет выбрать лучший из рассматриваемых вариантов на каждом шаге разработки с использованием формализованной процедуры и может применяться для сравнения вариантов технических решений на разных стадиях проектирования в различных областях техники и жизнедеятельности.

Методика адаптивна, т. е. полученные в результате выполнения этапов работы экспериментальные данные используются для уточнения "априорных" распределений. "Эксперименты" могут быть расчетные или реальные физические. "Усечение" неперспективных по данному критерию направлений существенно сокращает объемы затрат на расчеты.

Программа расчетов, построенная при помощи современных средств разработки с применением передовых информационных Active X-технологий, может быть адаптирована к широкому кругу задач, т. к. является OLE-сервером, и может быть полезна в использовании не только технологами, но и разработчиками программного обеспечения. Программное приложение имеет широкие возможности по подключению и использованию клиент-серверных баз данных, что делает его удобным для использования большими рабочими группами проектировщиков и разработчиков.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений.— М.: Наука, 1977.

2. Невлюдов И. Ш., Зубков В. М., Палагин В. А. Последовательный выбор лучшего варианта разработки // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. — 1999.— № 1.— С. 74—80.

3. Бушминский И. П., Даутов О. Ш., Достанко А. П. и др. Технология и автоматизация производства РЭА.— М.: Радио и связь, 1989.

4. Маслов В. П. Операторные методы.— М.: Наука, 1973.

5. Восков Л. С., Абрамов В. Н., Авдотин С. М. Пути ускоренного создания ГПС.— Кишинев: Картя Молдовеныска, 1987.

6. Райфа Г. Анализ решений. Введение в проблему выбора в условиях неопределенности.— М.: Мир, 1977.

7. ОСТ 92-4676—85 Микросборки толсто пленочные. Типовые технологические процессы изготовления плат.— М.: Радио и связь, 1987.

8. А. с. 1168079 СССР. Способ изготовления толсто пленочных печатных плат / В. А. Палагин, Н. Г. Мороз, П. Н. Богатов, В. П. Дегтярев.— Опул. в Б. И. — 1985, № 5.

9. Супертехнология // Электронная промышленность.— 1989.— № 8.— С. 13.

10. Электронная библиотека. The January 2000 release of the MSDN Library.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА ЭлектроТехноЭкспо 2002

Москва, ВВЦ, павильон № 20 30 октября — 2 ноября 2002 г.

- ✓ Электрические машины и аппараты, трансформаторы, источники тока, кабельные изделия, силовые полупроводниковые приборы, электротермические установки, силовые конденсаторы, электроинструмент
- ✓ Электроэнергетика и энергосбережение
- ✓ Электроника, системы автоматизации, средства связи и телекоммуникации
- ✓ Специализированный салон MERA: средства измерения, контроля и автоматизации, метрологическое обеспечение в электроэнергетике
- ✓ Светотехника
- ✓ Бытовые электротехнические изделия, аудио- и видеоаппаратура
- ✓ Специальное технологическое оборудование для производства электротехнических изделий, электронных компонентов и модулей
- ✓ Оборудование для обработки материалов
- ✓ Электротехнические материалы
- ✓ Электротехнические установки экологического назначения
- ✓ Научно-техническая литература

В рамках выставки будет проведен симпозиум
"Электротехника и электроэнергетика в XXI веке: итоги и перспективы".

Оргкомитет: 115093, г. Москва, ул. Люсиновская, 36.

Тел./факс (095) 363-50-32, 363-50-33.

E-mail: electro@mayer.ru

<http://www.mayer.ru/electro>