

05.13.06

**И.С. Можаровский**

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,  
Владивосток, studvvsu@gmail.com

### **ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ МАССООБМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО ПРОДУКТА ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННЫ**

*В работе представлены результаты применения метода построения непараметрических прогнозирующих моделей оценки показателя качества выходного продукта промышленных ректификационных колонн, основанной на использовании алгоритма альтернативных условных чередующихся математических ожиданий. Приведен сравнительный анализ предложенного метода с существующими подходами на примере промышленной колонны К-1 производства метил-трет-бутилового эфира.*

*Ключевые слова: прогнозирующая модель, непараметрические методы, алгоритм ACE, нелинейность, массообменный технологический процесс, ректификационная колонна.*

Переработка нефти является сложным процессом, требующим постоянного контроля качества на каждом этапе производства. В настоящее время для оценки контроля качества используются лабораторные анализы, поточные анализаторы и прогнозирующие математические модели. Поточные анализаторы требуют постоянной калибровки, стоимость их высока и не всегда имеется возможность установить такие устройства на промышленный объект. Лабораторные анализы не обладают достаточной информативностью, так как измерения производятся два раза в сутки, за это время подаваемое сырье в ректификационной колонне (РК) может измениться, обычно, это приводит к отклонению качества производимого продукта от заданных стандартов. Поэтому разработка адекватных прогнозирующих математических моделей оценки показателя качества (ММОПК) выходного продукта РК является актуальной. Такие модели позволяют оценить качество товарного продукта раз в минуту, что дает возможность встраивать их в подсистемы автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП). Благодаря чему происходит оперативное реагирование на отклонения значений параметров качества производимой продукции, изменяются режимы работы колонны, что в конечном итоге приводит к оптимизации производства по энерго-затратам и минимизации производства брака.

Однако, в настоящее время адекватных прогнозирующих математических моделей на производстве мало, из-за сложной структуры технологического объекта и большого количества явных и неявных факторов, влияющих на выходные значения моделей. Данной проблематике посвящено множество научных работ [1], которые применяют различные методы и подходы к моделированию массообменных технологических объектов. Особой сложностью при построении таких моделей является отсутствие структуры модели исследуемого объекта. Одним из способов решения этой проблемы является метод определения индекса структурной идентифицируемости на основе алгоритма (*alternating conditional expectation – ACE*) и дополнительного некоррелируемого с выходом входа [2]. К тому же данный метод позволяет оценить вклад каждого входа в модели и тем самым определить наиболее информативные регрессоры при ее построении.

Дополнительной проблемой при построении адекватных прогнозирующих ММОПК для промышленных РК является нелинейность процесса. Необходимо использовать нелинейные методы моделирования, которые зачастую сложны в реализации и не всегда дают

положительные результаты в задачах построения прогнозирующих моделей для массообменных технологических объектов.

Объектом исследования является процесс производства метил-трет –бутилового эфира (МТБЭ), для получения этого компонента бензина, обладающего высоким октановым числом, используется изобутилен, находящийся в сырье, и метанол. Метил-трет-бутиловый эфир способствует практически полному сгоранию топлива в двигателе, благодаря присутствующему в его молекуле кислороду, при этом является нетоксичным компонентом. Основная реакция синтеза МТБЭ протекает в реакторе. Технологическая схема его производства приведена на рисунке 1.

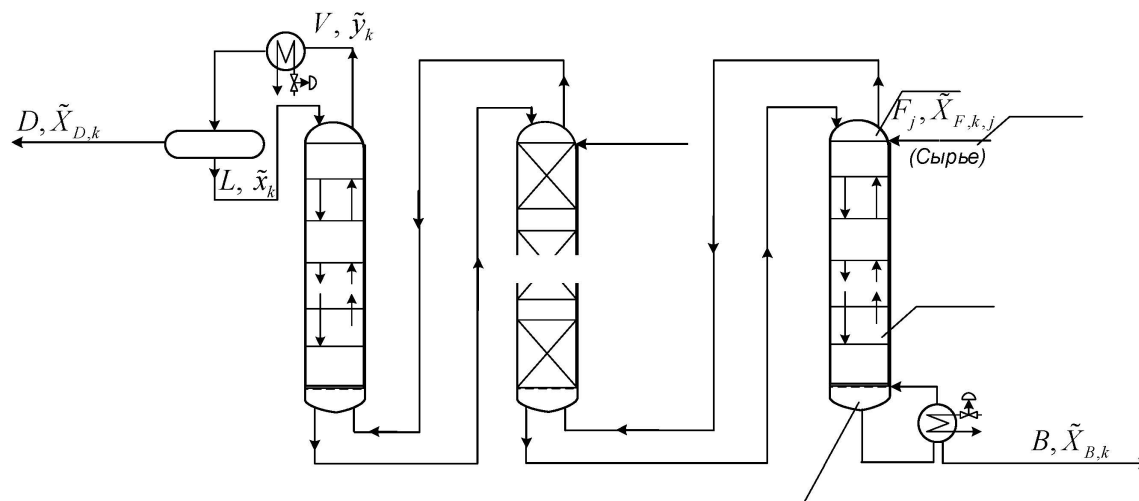


Рис. 1 – Технологическая схема процесса производства МТБЭ  
К-1, К-2 – ректификационные колонны;  
MeOH – метанол; МТБЭ – метил-трет-бутиловый эфир

Ставится задача разработки адекватных моделей для прогнозирования качества выходного продукта (концентрации метанола в МТБЭ) для РК К-1. Метанол не должен превышать 1,5% от массовой доли производимого продукта. В случае превышения этого показателя вся партия отправляется на дополнительную переработку, что влечет за собой энергетические, временные и финансовые затраты.

В качестве входных переменных использовались:  $X_1$  – температура низа колонны К-1, °С (Т);  $X_2$  – давление низа колонны К-1, МПаг (Р),  $X_3$  – дополнительный стохастический вход (некоррелируемый с выходом).

На основе экспериментальных данных, определили информативность каждого входа, методом определения индекса структурной идентифицируемости, результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Индексы структурной идентифицируемости РК К-1

Параметр	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
$H_i$	20,0800	8,8069	1,0000	10,3979

Из таблицы 1 можно сделать вывод, что вход  $X_1$  влияет на формирование выхода больше в сравнении с входом  $X_2$ , и используемые входы достаточно информативны для построения адекватной математической модели. Индекс структурной идентифицируемости для исследуемой выборки  $H_i = 10,3979$ , что свидетельствует о возможности построения адекватной математической модели, так как он выше порогового значения  $H_p = 5$ .

Были построены модели с помощью различных методов моделирования: методом наименьших квадратов; робастной регрессии; проекцией на скрытые структуры; нейронная сеть с обратной связью (НС); предлагаемым методом на основе алгоритма ACE[3]. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения  $R^2$  и RMSE для представленных моделей.

Метод построения модели	$R^2_{обуч}$	$R^2_{пров}$	RMSE <sub>обуч</sub>	RMSE <sub>пров</sub>
Метод наименьших квадратов	0,7755	0,8767	0,1821	0,1365
Робастная регрессия	0,7646	0,8769	0,1864	0,1363
Проекция на скрытые структуры	0,7755	0,8767	0,1821	0,1365
Нейронная сеть с обратной связью (НС)	0,7857	0,8992	0,1780	0,1234
Модель, на основе алгоритма ACE	0,9996	0,9820	0,0032	0,0521

На рисунке 2 отображены модели, построенные с помощью нейронных сетей и алгоритма ACE на проверочной выборке данных.

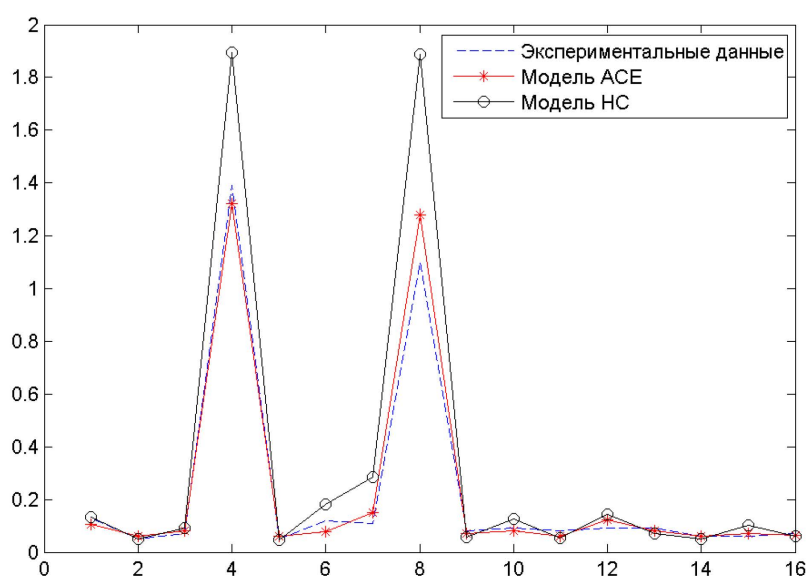


Рис. 2 – Результаты моделирования на проверочной выборке данных

Из таблицы 2 можно сделать вывод, что выборка данных с помощью которой было осуществлено моделирование является достаточно информативной, это подтверждается ранее определённым индексом структурной идентифицируемости  $H_i = 10,3979$ . Каждый метод моделирования сформировал адекватные модели ( $R^2_{пров} > 0,75$ ), однако наиболее точная модель, построена с помощью подхода, основанного на использовании алгоритма ACE, что указывает на эффективность данного метода и актуальность его применения в дальнейшем.

### Список литературы

1. Kuhn M., Johnson K. Applied predictive modeling. – NY : Springer, 2013. – 600 p.
2. Дуго Г.Б. и др. Анализ идентифицируемости нелинейных объектов управления слабо формализованной структуры // Информатика и системы управления. – 2012. – №. 3. – С. 34.
3. Можаровский И.С., Самотылова С.А., Торгашов А.Ю. Предсказательное моделирование массообменного технологического объекта с использованием алгоритма чередующихся условных математических ожиданий // Математическое моделирование. – 2020. – Т. 32. – №. 3. – С. 127-142.