

ТЕСТ ВНУТРЕННИХ СВОЙСТВ ТРЕНАЖЕРА ТЕПЛООВОГО ЭНЕРГОБЛОКА

Александр С. Рубашкин, “Тренажеры для электростанций”, Россия, Москва, Семеновский пер., 15, 224,
Владимир А. Рубашкин, “Тренажеры для электростанций”, Россия, Москва, Семеновский пер., 15, 224,
pps@edunet.ru, www.fpps.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Тепловой энергоблок, моделирование, критериальные уравнения теплообмена.

АБСТРАКТ

Каждый разработчик тренажеров всегда их хвалит, вне зависимости от того, насколько они хороши. Его предыдущие заказчики также могут хвалить эти тренажеры. Это не обязательно означает, что тренажер действительно хороший – это может означать что угодно. Например, что заказчик просто никогда не видел ничего лучше. Раньше когда были доступны только черно-белые телевизоры, многие были восхищены ими – они просто не видели ничего лучшего. Как потенциальный заказчик может выбрать разработчика для своего тренажера, если он не имеет объективной информации, на которую он мог бы опереться? Мы предлагаем всем разработчикам добровольно провести на каком-либо своем тренажере ряд тестов, которые могли бы раскрыть для заказчиков и их экспертов внутренние особенности технологии моделирования, которую применяет разработчик. Данная статья представляет один из таких тестов.

ВВЕДЕНИЕ

На Европейской конференции по моделированию ESS-2004 мы предложили деление тренажеров для тепловых электростанций на 3 поколения для их классификации. Деление было сделано на основе используемой в тренажере технологии разработки моделей оборудования.

Тренажеры 1-го поколения Т1П рассматривают моделируемый энергоблок в значительной мере как черный ящик. Технологическая структура энергоблока и его конструктивные параметры, которые в сущности и определяют то как он работает, остаются вне структуры модели. Модели для таких тренажеров создаются на основе воспроизведения известных статических и динамических свойств моделируемого энергоблока. В большинстве случаев экспериментальные данные, полученные непосредственно на работающем энергоблоке, являются источником этих характеристик. Основная проблема Т1П – это низкая точность моделирования. Результатом этой низкой точности является то, что в таких тренажерах тепловой и массовый баланс достаточно часто не выполняется, и пользователь в первую замечает именно это.

Тренажеры 2-го поколения Т2П – это существенный шаг вперед в технологии создания тренажеров. В та-

ких тренажерах законы сохранения энергии, массы и количества движения строго соблюдаются. Внутренняя структура моделируемого объекта главным образом описывается совокупностью дифференциальных уравнений баланса. Для модели, основанной на дифференциальных уравнениях баланса, объект уже не является черным ящиком. Поскольку уравнения баланса записываются для связанных друг с другом элементов объекта, структура системы уравнений баланса и связи между уравнениями отражают структуру компонентов объекта. Одним из недостатков таких тренажеров с точки зрения разработчика является то, что в процессе разработки модели объекта коэффициенты уравнений определяются в значительной мере на основе наблюдений за поведением реального энергоблока. Это приводит Т2П к очевидному недостатку адекватности моделирования, особенно для таких режимов работы моделируемого оборудования, для которых экспериментальные данные отсутствуют (пуски, многие нестандартные режимы). Большинство ведущих мировых производителей предлагают именно Т2П.

Тренажеры 3-го поколения (Т3П) являются следующим шагом по сравнению с Т2П. Главные отличия Т3П от Т2П следующие:

- одна из главных целей Т3П – в любом режиме работы моделируемого объекта не только видимые заказчику переменные должны иметь точные значения, но и все важные внутренние невидимые переменные, от которых зависит режим работы, должны также иметь точные значения
- сформулированная выше цель требует от разработчика использовать наиболее сложные варианты уравнений, описывающих поведение моделируемого объекта
- на этапе разработки тренажера наблюдение за поведением реального объекта практически не используется
- большинство коэффициентов в уравнениях либо непосредственно вычисляются на базе конструктивных данных объекта, либо они статически оцениваются с высокой точностью на основе обобщения информации по аналогичному оборудованию

Данная статья иллюстрирует некоторые из вышеназванных свойств Т3П. Чтобы сделать это мы протестировали один из наших тренажеров. Полные результаты тестов с цветными картинками можно найти на нашем сайте www.fpps.ru. В данной статье представлен один из тестов.

ПОЧЕМУ ЭТО ДОЛЖНО БЫТЬ ОБЩЕИЗВЕСТНО

В каждый момент времени суть профессиональной деятельности оператора состоит в следующем:

- принять решение, какая информация сейчас необходима для диагностирования ситуации
- получить требуемую информацию с помощью АСУ, установленного на блоке
- диагностировать ситуацию на основе имеющейся информации
- принять технологическое решение, что необходимо делать на блоке
- выполнить принятое решение с помощью АСУ

Пункты 1, 3 и 4 этого списка относятся к умению принимать технологические решения (МТД-умение) а пункты 2 и 5 относятся к умению работать с установленной на блоке АСУ (WWD-умение).

И то, и другое умение надо тренировать. Даже если оператор присутствует на блочном щите только в качестве дежурного при АСУ с высокой степенью автоматизации, должны быть другие люди, которые умеют принимать технологические решения. В этом случае МТД-умение этих других людей надо тренировать. Далеко не всегда тренажер, который позволяет тренировать WWD-умение может быть использован для тренировки МТД-умения. Это зависит от качества модели, заложенной в тренажер.

Существует мнение, активно поддерживаемое разработчиками тренажеров, что лучшее средство для тренировки операторов – это полномасштабный тренажер, который имеет только один недостаток – относительно высокая цена. Но в общем случае нет никакой гарантии, что полномасштабный тренажер может быть реально использован для тренировки МТД-умения.

Более того, тренажер предназначенный для тренировки МТД-умения не может быть в чистом виде копией реального блочного щита. Реальная АСУ обычно не имеет многих измерений, которые необходимы для понимания того, как работает энергоблок. Для этого есть несколько причин:

- экономия средств при создании АСУ
- отсутствие технической возможности выполнить некоторые измерения

Влажность пара в последних ступенях ЦНД турбины - это пример параметра, который едва ли можно измерить на реальной турбине. С нашей точки зрения этот параметр необходим в тренажерах для тренировки МТД-умения.

Полномасштабные тренажеры по сути не являются тренажерами для тренировки МТД-умения. Они могут быть использованы для:

- тренировки WWD-умения
- для тренировки того, как управлять энергоблоком в соответствии с его инструкцией по эксплуатации и для тестирования умения работать в соответствии с инструкцией по эксплуатации

Если заказчик предпочитает иметь хороший тренажер для тренировки только МТД-умения, то точное воспроизводство АСУ в тренажере – это не требование к тренажеру, а только полезное, но дорогое свойство. В таком случае заказчику следует потребовать от раз-

работчика доказательств, что технология моделирования этого разработчика позволяет создавать тренажеры для тренировки МТД-умения.

Следует отметить, что достаточно часто точное воспроизводство АСУ в тренажере может быть хорошей уловкой, чтобы отвлечь внимание заказчика от того, что разработчик не умеет делать хорошо – моделировать котлы, турбины и другое оборудование.

КАКОЙ ТРЕНАЖЕР ТЕСТИРОВАЛСЯ?

Для тестирования мы использовали работающий на мазуте барабанный блок 200 МВ с естественной циркуляцией, с давлением в барабане 14 Мпа и давлением перед турбиной 13 Мпа.

Мазут подается в котел через 16 горелок. Из топки дымовые газы поступают в горизонтальный газоход, вначале проходя через ширмы. Потом газы поступают в конвективный перегреватель 1-ой ступени (КПП-1). После КПП-1 дымовые газы поступают в КПП-2, который является выходной ступенью для острого пара. За КПП-2 по ходу газов расположены пакеты промперегрева, экономайзера и регенеративного воздухоподогревателя.

ОСТАНОВ С ПОСЛЕДУЮЩИМ СТАРТОМ

Цель теста – продемонстрировать как моделируется газовый тракт котла. Рассматриваются параметры дымовых газов и металла в КПП-1.

На графиках можно увидеть, как в процессе опыта менялись следующие переменные:

- BMAZSC – расход мазута в котел (кг/сек)
- OXIG – содержание кислорода в уходящих газах (проценты)
- FDI14M – расход пара с котла по нитке А (тон/час)
- RA11T2 – температура острого пара в паропроводе острого пара за котлом (°C)
- TGMKN1 – температура газов в КПП-1 (°C) (средняя)
- KN1Tma – средняя температура металла теплообменников в районе КПП-1 (°C)
- TZMKH1 – средняя температура загрязненной стенки теплообменников в районе КПП-1 (°C)
- WGKN1 – скорость газов в районе КПП-1 (метр/сек)
- ALKKH1 – коэффициент теплоотдачи конвекцией к чистому металлу (ккал/(м²·ч·°C))
- KN1Nu – коэффициент кинематической вязкости газов КПП-1 (v·10⁶, м²/сек)
- KN1Li – коэффициент теплопроводности для газов КПП-1 (λ·10², ккал/(м·час·°C))
- KN1Pr – критерий Прандтля для газов в КПП-1
- BLKH1 – степень черноты газов в районе КПП-1
- ALLKH1 – коэффициент теплоотдачи излучением газов к чистому металлу (ккал/(м²·ч·°C))
- ALGKH1 – общий коэффициент теплоотдачи от газов к загрязненному металлу (ккал/(м²·ч·°C))

Опыт был построен следующим образом. Сразу же после начала опыта сработала защита, которая остановила котел и турбину. Оператором была произведена вентиляция топки после останова, которая заняла около 10 минут. После этого блок был законсервиро-

ван с тем, чтобы сохранить тепло для последующего пуска.

Через 1 час после останова оператор начал пуск котла. В момент времени 1 час 3 минуты началась вентиляция топки перед розжигом. В 1 час 20 минут был осуществлен розжиг котла. Опыт продолжался около 4 часов, хотя графики покрывают только первые 3 часа опыта.

Результаты опыта представлены 3 парами графиков, каждый из которых содержит по 5 переменных. В каждой паре рисунок с индексом а) показывает изменение выбранных переменных в первые 90 минут опыта, а рисунок с индексом б) показывает изменения тех же переменных в следующие 90 минут опыта.

Как изменялись выбранные переменные?

В процессе вентиляции топки после останова (время 1-10 минут) через котел проходило относительно много воздуха, необходимого для вентиляции. Массовый расход воздуха был даже несколько больше, чем расход воздуха в номинальном состоянии, однако скорость газов в районе КПП-1 (WGKH1) значительно упала по сравнению с номинальным значением: в процессе вентиляции топки скорость газов в районе КПП-1 (WGKH1) была около 2.6 метров в секунду (рисунок 1-б), в то время как при номинальной нагрузке котла скорость была равна 8.8 метров/секунду. Это обусловлено тем, что температура газов в районе КПП-1 (TGMKH1) в процессе вентиляции была значительно ниже, чем при номинальной нагрузке.

В это же время происходило следующее:

- Т газов в районе КПП-1 (TGMKH1) снизилась с номинального значения 1000 °С до значения примерно 220 °С и стабилизировалась (рисунок 1-а);
- средняя температура металла теплообменников в районе КПП-1 (KH1Tma) плавно падала с номинального значения 490 °С до 370 °С (рисунок 2-а);
- Т пленки загрязнения поверх чистого металла (TZMKH1) также падала, и все время была меньше Т чистого металла (KH1Tma) - рисунок 2-а;
- коэффициент кинематической вязкости газов в районе КПП (KH1Nu) упал с номинального значения 172.5 до 34 и стабилизировался (рисунок 2-а);
- коэффициент теплопроводности газов в районе КПП (KH1Li) упал с номинального значения 9.6 до 3.6 и стабилизировался (рисунок 3-а);
- критерий Прандтля для газов в КПП-1 (KH1Pr) вырос с номинального значения 0.58 до значения 0.66 (рисунок 3-а);
- коэффициент конвективной теплоотдачи (ALKKH1) упал с номинального значения 57 до значения 32;
- степень черноты газов в КПП-1 (BLKH1) упала с номинального значения 0.14 до значения 0.06, что соответствует отсутствию продуктов сгорания при температуре 200-250°С (рисунок 3-а);
- лучистый коэффициент теплоотдачи (ALLKH1) упал с номинального значения 33 практически до 0
- общий коэффициент теплоотдачи (ALGKH1) от газов к металлу с учетом загрязнения металла упал с номинального значения 57 до значения 20 (рисунок 3-а)

Коэффициент конвективной теплоотдачи зависит от коэффициента теплопроводности в первой степени и от частного при делении скорости газов на коэффициент кинематической вязкости в степени 0.65, кроме того он зависит еще и от критерия Прандтля в степени 0.33.

Попробуем на основе имеющихся графиков подтвердить, что в тестируемом тренажере коэффициент конвективной теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\text{Alfa} = k \cdot \lambda \cdot (w/v)^{0.65} \cdot \text{Pr}^{0.33}$$

где k – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции газохода КПП-1,

λ – коэффициент теплопроводности газов

w – скорость газов

v – коэффициент кинематической вязкости газов

Pr – критерий Прандтля для газов

В номинальном состоянии имеем:

$$\lambda \cdot (w/v)^{0.65} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 9.6 \cdot (8.8/172.5)^{0.65} \cdot 0.58^{0.33} = 1.1593$$

Номинальное значение коэффициента конвективной теплоотдачи (ALKKH1) равно 57. Если наше предположение верно, то $k=57/1.1593=49.2$

Тогда наше предположение звучит так: в тестируемом тренажере коэффициент конвективной теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\text{Alfa} = 49.2 \cdot \lambda \cdot (w/v)^{0.65} \cdot \text{Pr}^{0.33}$$

Исходя из имеющихся на рисунках 1-3 данных, в момент времени 7 минут имеем:

$$49.2 \cdot \lambda \cdot (w/v)^{0.65} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 49.2 \cdot 3.7 \cdot (2.7/33)^{0.65} \cdot 0.665^{0.33} = 31.3$$

На рисунке 2-а видим, что в момент времени 7 минут коэффициент конвективной теплоотдачи (ALKKH1) был примерно равен 32 – наше предположение подтверждается.

Продолжим анализ опыта.

Оператор закончил вентиляцию и закупорил котел для того, чтобы сохранить тепло для предстоящего пуска. Начался процесс естественного остывания.

При этом температура металла в районе КПП-1 (KH1Tma) стала уменьшаться очень медленно (рисунок 1-а), поскольку этот участок находится внутри котла, который был закупорен. В это же время температура пара в паропроводе острого пара (RA11T2) падала гораздо активней (рисунок 1-а), поскольку у паропровода есть потери тепла через изоляцию.

Отметим, что в это время температура загрязняющей пленки на поверхности металла РПП-1 (TZMKH1) сравнялась с температурой самого металла (KH1Tma) (рисунок 2-а).

Скорость газа в районе КПП-1 (WGKH1) упала практически до 0 (рисунок 1-а), в результате чего коэффициент конвективной теплоотдачи (ALKKH1) также значительно снизился (рисунок 2-а). Температура газов (TGMKH1) поднялась до 345 °С (рисунок 1-а), а температура металла (KH1Tma) стала равна 350 °С (рисунок 2-а) – при отсутствии расхода газов их температура становится равной температуре металла.

Коэффициент кинематической вязкости газов (KH1Nu) установился на новом значении чуть меньше 50, что также соответствует новой температуре газов 350 °С.

Вслед за увеличением температуры газов:

- коэффициент теплопроводности газов (KH1Li) также увеличился до нового значения 4.5 (рис. 3-а)

- критерий Прандтля для газов ($KH1Pr$) уменьшился до значения 0.65 (рисунок 3-а)

В момент времени 1 час оператор приступил к растопке блока.

В период времени от 1 час 5 минут до 1 час 15 минут производилась вентиляция котла перед розжигом. Эта вентиляция производилась при меньшем расходе воздуха по сравнению с вентиляцией в период с 1-ой по 10 минуты после остановки блока. В результате в процессе этой новой вентиляции:

- скорость газов в районе КПП-1($WGKH1$) поднялась до 1.6 м/сек, в то время как во время первой вентиляции она была 2.6 м/сек (рис. 2-а);
- температура газов в районе КПП-1 ($TGMKH1$) упала до уровня 250 °С, но это выше чем при первой вентиляции, поскольку расход воздуха при второй вентиляции был меньше (рис. 1-а);
- температура острого пара в паропроводе ($RA11T2$) стала уменьшаться более активно потому, что к процессу естественного остывания добавился процесс падения давления в паровом тракте котла в результате вентиляции (рис. 1-а);
- Т металла КПП-1 ($KH1Tma$) стала снижаться более активно, поскольку в газоходе КПП-1 появился расход относительно холодного воздуха (рис. 2-а);
- температура пленки загрязнения поверх чистого металла ($TZMKH1$) стала ниже температуры металла КПП-1а ($KH1Tma$) – рис. 2-а
- все другие переменные также отреагировали реалистично

В момент времени 1 час 20 минут был произведен розжиг котла. Появился расход мазута в топку ($BMAZSC$), содержание кислорода ($OXIG$) стало около 12 процентов. Появился расход пара с котла. Напомним, что в первой части опыта с одной стороны 2 раза проводилась вентиляция топки, а с другой стороны, в силу того, что котел был закупорен, не было расхода пара с котла. Как результат этих факторов, металл внутри обогреваемой зоны котла охладился значительно сильнее, чем металл необогреваемых паропроводов, охлаждение которых состояло только в естественном остывании. Поэтому перед началом растопки котла пар в необогреваемых паропроводах был значительно горячее пара внутри котла. В результате, как только после розжига котла появился расход в главный паропровод относительно холодного острого пара, то температура пара в паропроводе резко упала. Все эти явления хорошо видны на рисунке 2-а.

Кроме этого произошло следующее:

- в результате горения топлива Т газов в КПП-1 ($TGMKH1$) возросла до уровня 600 °С (рис. 2-б);
- вследствие повышения температуры газов ($TGMKH1$) и увеличения их количества возросла скорость газов ($WGKH1$) - рис. 2-б;
- как следствие главным образом повышения скорости газов, возрос коэффициент конвективной теплоотдачи ($ALKKH1$) – рис. 2-б
- температура метала ($KH1Tma$) стала увеличиваться, при этом температура загрязняющей пленки на поверхности металла ($TZMKH1$) стала выше температуры металла – рисунок 2-б

- коэффициент кинематической вязкости газов ($KH1Nu$) увеличился вследствие увеличения температуры газов – рис. 2-б

- изменилась чернота потока газов ($BLKH1$) вследствие того, что в дымовых газах появились продукты сгорания – рис. 3-б

- как следствие главным образом изменения температуры газов ($TGMKH1$), возрос коэффициент лучистой теплоотдачи ($ALLKH1$) – рис. 3-б

- коэффициент теплопроводности ($KH1Li$) и критерий Прандтля ($KH1Pr$) для газов отреагировали адекватно – рис. 3-б

Давайте для момента времени 1 час 30 минут подсчитаем по графикам значение выражения:

$$49.2 \cdot \lambda \cdot (w/v)^{0.65} \cdot Pr^{0.33} = 49.2 \cdot 6.4 \cdot (2.2/90)^{0.65} \cdot 0.61^{0.33} = 23.96$$

По графику на рисунке 2-б в это же время значение коэффициента конвективной теплоотдачи ($ALKKH1$) равно примерно 24. Таким образом, можно сделать теперь уже подтвержденный вывод, что в тестируемом тренажере коэффициент конвективной теплоотдачи от дымовых газов к металлу во всех режимах рассчитывается по формуле:

$$k \cdot \lambda \cdot (w/v)^{0.65} \cdot Pr^{0.33}$$

Стоит отметить, что при разработке тестируемого тренажера коэффициент k был определен не на основе наблюдения за поведением реального объекта, а по конструктивным данным котла. Существует специальная технология определения коэффициента k для перегревателя любого типа для котла любого типа. Российская фирма “Тренажеры для электростанций” владеет этой технологией.

ВЫВОДЫ

Тестируемый тренажер во всех режимах работы блока правильно рассчитывает:

- температуру газов в газоходах котла;
- обогреваемые поверхности котла и его необогреваемые поверхности, без объединения этих поверхностей в единое целое;
- температуру металла теплообменников котла, при этом учитывается загрязнение металла отложениями продуктов сгорания
- скорость движения дымовых газов в газоходах котла с учетом изменения температуры и расхода дымовых газов
- теплообмен от дымовых газов к металлу на основе критериальных уравнений теплообмена; аппроксимация не применяется

Значительная часть приведенных здесь переменных не поддается аппроксимации и верификации по результатам проведения испытаний на реальном оборудовании просто потому, что эти переменные на реальном оборудовании не измеряются. В то же время для расчета теплообмена между дымовыми газами и металлом на основе фундаментальных физических законов и критериальных уравнений теплообмена некоторые из приведенных здесь переменных необходимы. Если разработчик тренажера не в состоянии продемонстрировать на достаточно сложных опытах реалистичные графики изменения большинства из представленных в этом тесте переменных, или их аналогов, то данный разработчик не применяет кри-

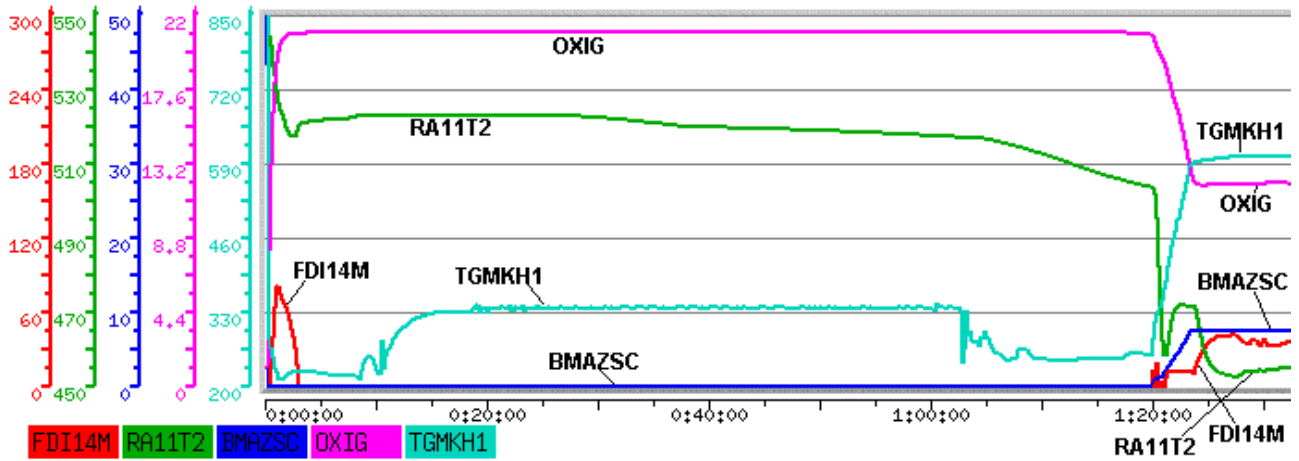
териальных уравнений теплообмена для вычисления теплоотдачи от дымовых газов к металлу. Если это так, то все заявления такого разработчика, что его тренажеры являются всережимными и реалистичными не соответствуют действительности, даже если пользователям нравятся его тренажеры.

Критериальные уравнения теплообмена – это формулы, которые инженеры по котлам во всем мире используют для статического расчета котлов как в случае разработки нового котла, так и в случае проверочного расчета существующего котла. Сам факт, что тестируемый тренажер использует эти же формулы для динамических расчетов всех режимов работы тепловых энергоблоков является серьезным техническим достижением для индустрии моделирования тепловых энергоблоков.

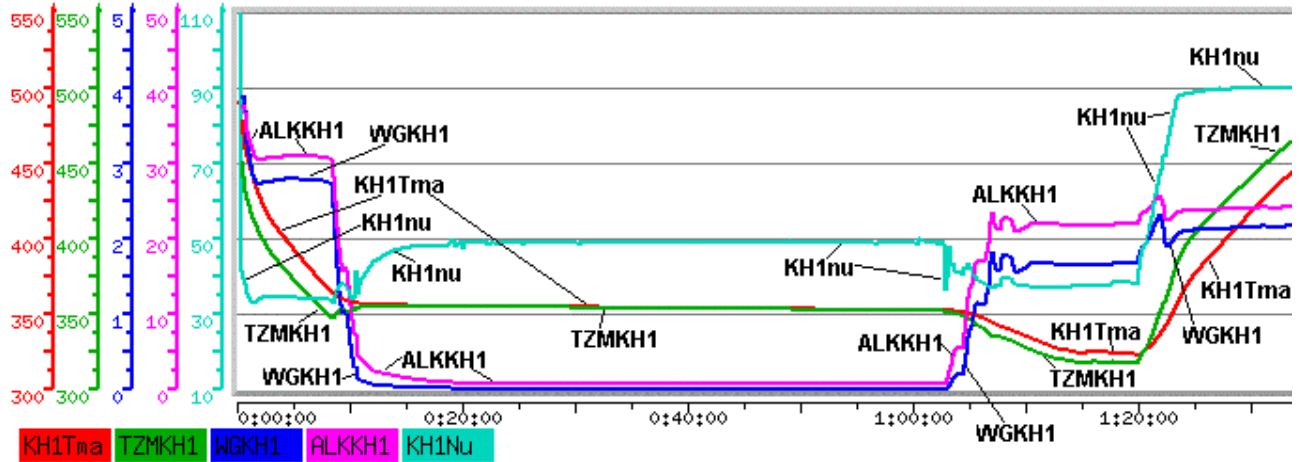
БИОГРАФИЯ АВТОРОВ

АЛЕКСАНДР С. РУБАШКИН родился в Москве в 1936 году. Окончил МЭИ. Имеет степень кандидата наук в области автоматизации электростанций. В течение более 20 лет он работал в известной российской инженерной фирме ОРГРЭС, специализирующейся на тепловых электростанциях. Начал исследования в области моделирования тепловых электростанций в середине 70-х годов. В 1992 году он основал и возглавил фирму “Тренажеры для электростанций”.

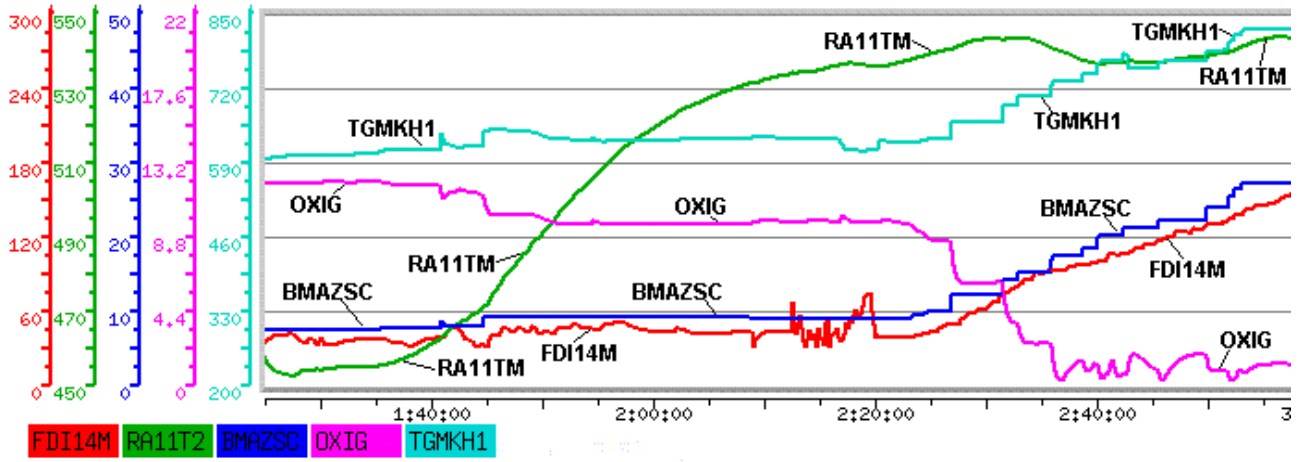
ВЛАДИМИР А. РУБАШКИН родился в Москве в 1963 году. Окончил Московский институт железнодорожного транспорта по специальности вычислительная техника. По окончании института в течение 6 лет работал в Московском академическом институте проблем управления. С 1992 года работает в фирме “Тренажеры для электростанций” на должности технического директора.



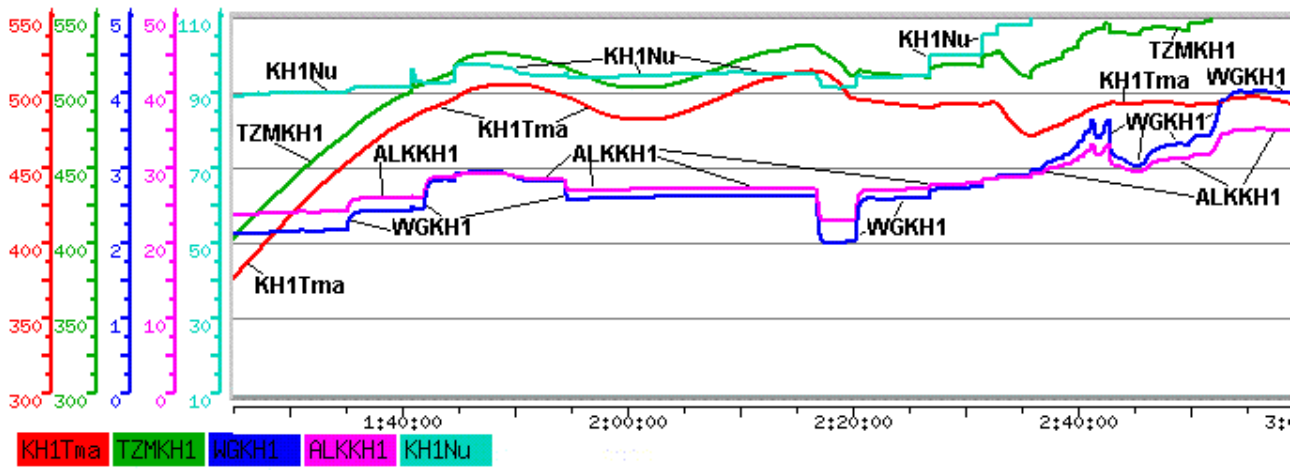
Picture 1-a



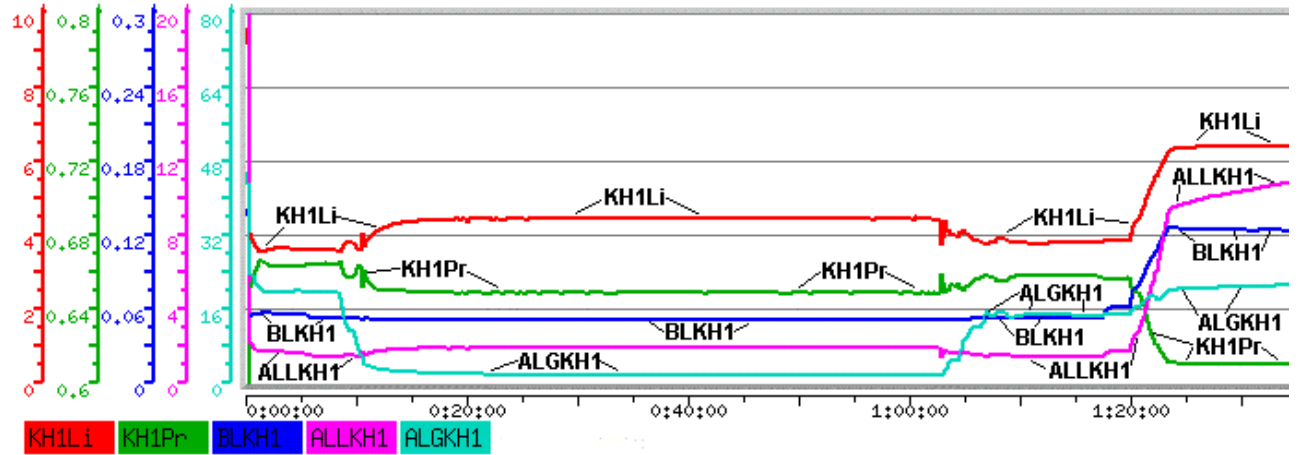
Picture 1-b



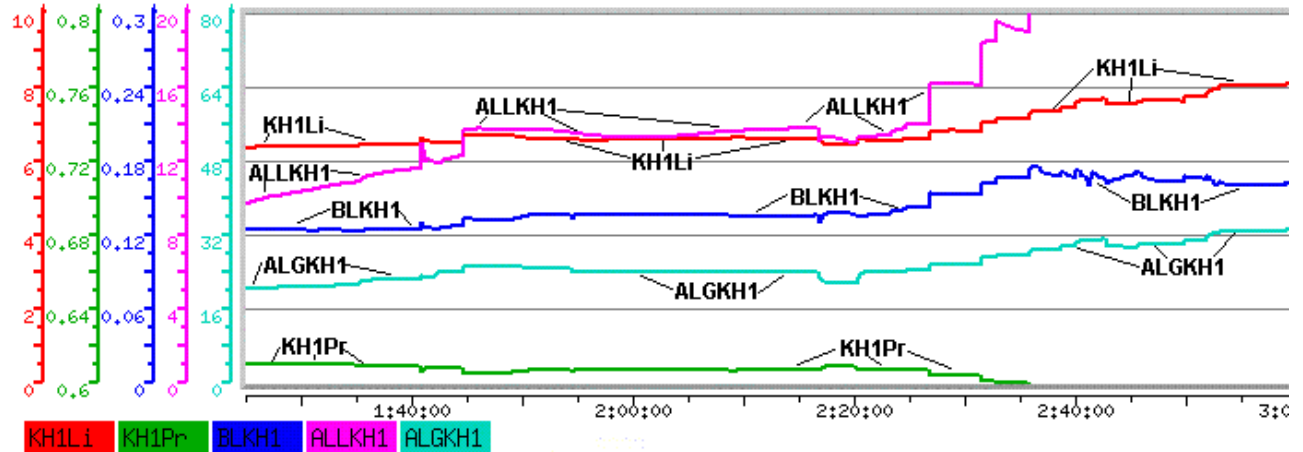
Picture 2-a



Picture 2-b



Picture 3-a



Picture 3-b