

На правах рукописи

Букурако Юлия Константиновна

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ
УСТАНОВКОЙ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.25.05 – “Информационные системы и процессы,
правовые аспекты информатики”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Тамбов 2004

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В условиях рыночного производства чрезвычайно важным для промышленных предприятий является умение быстро и эффективно перестраивать свою работу в соответствии с запросами потребителей их продукции. При этом необходимо управлять технологическими объектами так, чтобы достигался наилучший, в определенном смысле, результат. Поскольку в настоящее время цены на энергию весьма высоки, а зачастую близки к мировым, то одной из главных задач тех производств, в составе себестоимости получаемой продукции которых доля энергетических затрат велика, является их экономия.

Повышение эффективности управления технологическими объектами на подобных производствах способствует этому. Актуальной является задача управления крупными воздухоразделительными установками (ВРУ), работающими в составе кислородных производств металлургических комбинатов. На энергоемких установках большой мощности получают около 90 % общего количества продуктов разделения воздуха, потребляемых в черной и цветной металлургии, а также в химической промышленности и промышленности минеральных удобрений. В известной степени можно сказать, что минимизация электрической энергии, затрачиваемой на разделение воздуха с целью получения требуемого количества целевых продуктов, эквивалентна минимизации их себестоимости.

Известно, что потребление продуктов разделения воздуха в условиях реального производства на металлургических комбинатах имеет переменный характер, в то время как сами ВРУ обычно работают в режиме постоянной производительности. Последнее объясняется тем, что отечественные системы управления позволяют поддерживать лишь номинальный и близкий к нему технологические режимы. Соответственно, при большей, чем требуется потребителю, выработке целевых продуктов имеют место прямые потери электрической энергии на получение “ненужного” продукта.

Решение задач управления установками разделения на производстве в режиме реального времени и, в первую очередь, решение задачи перевода с одного технологического режима, соответствующего некоторой производительности по продуктам разделения, на другой режим, обеспечивающий новую производительность, невозможно с помощью традиционных методов. Действительно, при управлении должны использоваться математические модели статики и динамики установки, которые, однако, столь сложны, что при возможностях нынешних систем управления вычислительные затраты становятся несоизмеримыми со временем перевода. Поэтому необходимо разрабатывать нетрадиционные подходы и использовать новые информационные технологии, которые помогли бы избежать упомянутых трудностей.

В последние годы приобрели большую значимость в разных сферах деятельности человека интеллектуальные системы и, в частности, экспертные системы (ЭС), основанные на знаниях экспертов, т.е. специалистов в конкретных областях человеческой деятельности. Среди них значительный интерес для целей управления технологическими объектами представляют динамические экспертные системы реального времени. В их архитектуру, по сравнению с обычными (статическими) ЭС, введены блоки моделирования внешнего мира, связи с внешним окружением и учета временной логики обрабатываемых событий. Эти системы могут играть роль советчика в автоматизированных системах управления, обладая при этом средствами самостоятельного извлечения знаний из поступающих данных.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с Межвузовскими научно-техническими программами Министерства образования РФ: “Информационные технологии в образовании и науке” (1999 г., код 630) и “Системы энергосбережения и технологии освоения нетрадиционных, возобновляемых источников энергии” (1999 г., код 447).

Цель работы заключается в создании экспертной системы управления реального времени (ЭСУ РВ) крупной воздухоразделительной установкой низкого давления КА-32, на которой получают газообразные технический кислород и чистый азот. ЭСУ РВ дополнит возможности существующей системы управления установкой, входящей в состав кислородного производства на ОАО “Новолипецкий металлургический комбинат”.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить исследования, связанные с приобретением и извлечением знаний о работе установки при различных производительностях по продуктам разделения, описанием знаний на специальном языке представления знаний, разработкой базы знаний и выбором рациональной оболочки для ЭСУ РВ.

Методы исследования. В работе для решения сформулированных задач использовались методы математического моделирования и оптимизации, теории автоматического управления и теории искусственного интеллекта.

Научная новизна.

– Разработан подход, позволяющий создавать экспертные системы управления технологическими объектами, работающими при переменном потреблении их продукции, который основан на “гибридных” знаниях, включающих как экспертные знания о некоторых режимах функционирования объектов, так и знания о других возможных технологических режимах, полученные с помощью математического моделирования.

– Определена наиболее рациональная модель представления “гибридных” знаний, в качестве которой выступает производственная модель, и разработана соответствующая система условий, реализация которых позволяет управлять установкой.

– Извлечены знания из полученной от экспертов информации о работе ВРУ в режимах, соответствующих номинальной и близкой к номинальной производительностям по продуктам разделения, которые использованы при построении базы знаний ЭСУ РВ.

– Извлечены знания из информации, полученной в результате проведения вычислительных экспериментов на математических моделях ВРУ, характеризующие ее работу в режимах, отличных от номинального и близких к нему, которые использованы при построении базы знаний ЭСУ РВ.

– Разработана база знаний ЭСУ РВ, основу которой составляет совокупность производственных правил с обратной цепочкой логического вывода.

– При математическом моделировании, наряду с разработанными ранее математическими моделями отдельных аппаратов, входящими в состав моделей ВРУ, использована модифицированная математическая модель регенератора, благодаря чему сократились общие вычислительные затраты на проведение “машинных экспериментов”.

Практическая ценность результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем.

– Разработанный подход к созданию ЭСУ РВ объектами, для которых характерна переменная производительность по целевым продуктам, не зависит от вида объектов, и, следовательно, может быть рекомендован для всех тех объектов, которые работают на производстве только в одном режиме, несмотря на переменный спрос их продукции.

– Разработанная ЭСУ РВ установкой предназначена для управления процессом ее перевода на новые технологические режимы и позволяет на практике перейти от работы только в номинальном или близком к нему режимам к фактической работе, обеспечивающей переменную производительность по продуктам разделения воздуха. Такая работа, которая ранее была просто невозможна, значительно сократит прямые потери электрической энергии, а, следовательно, приведет к снижению себестоимости получаемых продуктов.

– Разработанная методология получения информации о работе установки в различных технологических режимах, извлечения из информации нужных знаний, их представления и построения базы знаний является достаточно общей для воздухоразделительных установок и может быть применена, при небольшой доработке, учитывающей их специфику, к другим установкам разделения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на XIV Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях” (Смоленск, 2001 г.), XV Международной научной конференции “Математические методы в технике и технологиях” (Тамбов, 2002 г.), VIII и IX научных конференциях ТГТУ (Тамбов, 2003 и 2004 гг.).

Публикации. Материалы, отражающие основное содержание работы, изложены в 9 научных публикациях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка цитируемой литературы и приложений. Основная часть диссертации изложена на 121 странице машинописного текста, содержит 34 рисунка и 12 таблиц. Библиографический список литературы включает 229 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, кратко описано содержание глав, приведены основные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна и практическая значимость, выражены благодарности.

В первой главе проведенный литературный обзор научных работ по созданию экспертных систем в различных областях и, в первую очередь, динамических экспертных систем реального времени, используемых для решения задач управления, а также работ, посвященных управлению установками разделения воздуха, позволил обосновать направления исследований и задачи, которые необходимо решить.

Показано, что существующая система управления установкой КА-32, предназначенной для получения газообразных технического кислорода с концентрацией 99,5 % O_2 и чистого азота с концентрацией примеси 0,0005 % O_2 , не могут обеспечить реализацию режима переменной производительности в реальном времени. Объясняется это тем, что при управлении необходимо, как правило, использовать математические модели, которые весьма громоздки и требуют больших вычислительных затрат, не соизмеримых с темпом ведения процесса.

Рис. 1 Знания о возможных переходах с режима на режим

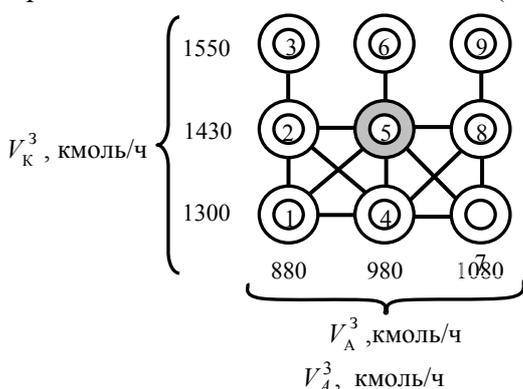
Предложен нетрадиционный подход решения задачи управления установкой, функционирующей в режиме переменной производительности по продуктам разделения, с помощью ЭСУ РВ, базирующейся на использовании “гибридных” знаний, получаемых как от экспертов, так и с помощью математического моделирования установки во всевозможных технологических режимах.

Вторая глава посвящена проблемам формирования знаний о предметной области для разрабатываемой ЭСУ РВ, т.е. выявлению свойств и особенностей объекта исследования с точки зрения последующего управления им.

Показано, что установку разделения, в которой предварительно сжатый в компрессорах воздух, охлажденный и очищенный далее в регенераторах, и затем при низких температурах разделяемый в ректификационных колоннах на целевые продукты, можно представить в виде объекта управления. При этом в качестве входной информации – входных переменных здесь выступают заданные значения отборов (расходов) технического кислорода V_K^3 , чистого азота V_A^3 и их концентраций y_K^3 и y_A^3 . Выходная информация – выходные переменные характеризуются текущими значениями концентраций технического кислорода y_K и чистого азота y_A . Управляющие воздействия – расходы воздуха на разделение V_B , грязной азотной флегмы $G_{фл}^Г$ и чистой азотной флегмы $G_{фл}^Ч$, соответственно. Кроме управляющих воздействий в процессе перевода установки с режима на режим могут изменяться также текущие значения отборов целевых продуктов, т.е. V_K и V_A . Таким образом, в процессе управления могут варьироваться пять переменных и, кроме того, после их задания, при необходимости, рассчитывается время $\tau_{п}$ переключения регенераторов.

С помощью математических моделей статики и динамики ВРУ получена различная информация о ее работе в технологических режимах, соответствующих разным значениям отборов V_K^3 и V_A^3 , из которой извлечены необходимые знания. При этом использованы модели установки, в которых аппараты представлены в виде отдельных модулей (математических моделей), которые соединены наборами данных, характеризующими материальные и тепловые потоки. Описание модулей, их свойств и моделей установки в целом приведены в работах В.Н. Шамкина, Ю.В. Кулакова и Б.И. Рожинского. Модифицирован модуль “регенератор”, в котором за счет применения некоторых аналитических зависимостей при нахождении начального распределения температуры насадки по высоте регенератора, удалось сократить время его расчета, и, соответственно, уменьшить общее время на проведение вычислительного эксперимента.

Исследованы статические и динамические свойства установки в широком спектре изменения ее производительности (от – 30 % до



+10 %). На рис. 1 номерами обозначены девять исследованных технологических режимов: номинальный (5), характеризуемый отборами $V_K^3 = 1430$ и $V_A^3 = 980$ [кмоль/ч] и восемь (1 – 4, 6 – 9), отличных от номинального.

Для каждого из этих режимов построены ОДУ – области допустимых управлений. Реализация управляющих воздействий, выбранных внутри конкретной области или на ее границе, обеспечивает качество получаемых продуктов разделения не хуже заданного, т.е. $y_K \leq y_K^3 = 99,5 \% O_2$ и $y_A \geq y_A^3 = 0,0005 \% O_2$.

В качестве примера на рис. 2 показано, как с помощью сечений ОДУ, соответствующих режимам потребления 1 (рис. 2, а), 5 (рис. 2, б) и 6 (рис. 2, в) с расходом $G_{\text{фл}}^{\Gamma}$ в качестве параметра, получаются новые знания. Так, из этих рисунков видно, что размеры и конфигурации областей определяются производительностью установки, и чем меньше ОДУ, тем меньше возможности для управления, и наоборот.

Полученные знания, а также другие выявленные нами знания о конкретных свойствах различных технологических режимов были учтены при разработке процедур перевода. При этом показано, что изменение заданий по отбору только одного из целевых продуктов, по сравнению с его номинальным значением, при фиксированных значениях отбора другого продукта (горизонтально и вертикально расположенные режимы на рис. 1) чаще всего благоприятно, с точки зрения осуществления перевода установки с режима на режим. Совместное же изменение заданий по отбору целевых продуктов (диагонально расположенные режимы на рис. 1) менее благоприятно, причем могут возникнуть серьезные трудности, а в отдельных случаях перевод будет невозможен (см. режимы на рис. 1 без соединительных линий).

Процедуры перевода установки разработаны для различных ситуаций и основываются на последовательном изменении значений управляющих воздействий и отборов целевых продуктов таким образом, чтобы не происходило ухудшение качества продукции ниже допустимого уровня, определяемого $y_{\text{к}}^{\text{д}} = y_{\text{к}}^3$ и $y_{\text{а}}^{\text{д}} = y_{\text{а}}^3$.

Рис. 2 Знания о режимах 1, 5, 6

На первом этапе требуется попасть в нужную ОДУ, а на втором – внутри этой области перейти к оптимальной точке. При этом предполагается, что каждый раз после нанесения соответствующих воздействий переходные процессы в установке заканчиваются.

Знания о процедуре перевода установки с режима 4 на режим 5 отражены на рис. 3. Здесь точка B задается оптимальными (в смысле минимума затрат электрической энергии на разделение воздуха) значениями управляющих воздействий и принадлежит границе соответствующего сечения ОДУ для режима 4. Аналогично задается точка A , находящаяся на границе сечения ОДУ для режима 5.

Реализация последовательности шагов $V_B \rightarrow G_{\text{ФЛ}}^{\text{ч}} \rightarrow V_B \rightarrow G_{\text{ФЛ}}^{\text{ч}} \rightarrow \rightarrow G_{\text{ФЛ}}^{\Gamma} \rightarrow V_K$, каждый из которых увеличивает значение некоторой переменной, позволяет в конечном итоге перевести точку B из ОДУ для режима 4 в точку F , расположенную внутри ОДУ, соответствующей режиму 5. При этом заметим, что шаг BC , характеризующий увеличение V_B , не совсем желателен, поскольку при этом ухудшается, хотя и незначительно, качество чистого азота. Однако, любое изменение $G_{\text{ФЛ}}^{\text{ч}}$ также вызывает негативное последствие – достаточно сильно снижается качество технического кислорода. Нежелательно и изменение $G_{\text{ФЛ}}^{\Gamma}$, хотя из рисунка это и не видно. Очевидно, что в этой ситуации нельзя увеличивать и V_K , поскольку воздуха будет недостаточно, а V_A нельзя изменять потому, что $V_A^3 = \text{const}$ для режимов 4 и 5. Дальнейшие шаги осуществляются внутри ОДУ для режима 5 и переводят точку F в оптимальную точку A этой же ОДУ. Процедура перевода завершена.

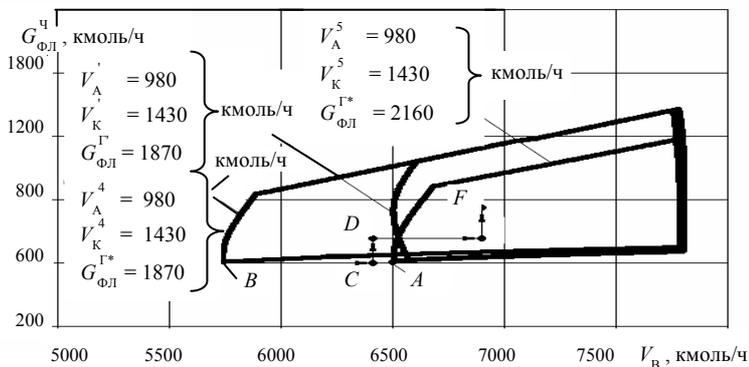


Рис. 3 Знания о переводе установки с режима 4 на режим 5

В третьей главе решаются вопросы, связанные с извлечением знаний из информации, полученной от экспертов и приобретенной с помощью математического моделирования, а также выбором наиболее эффективной формы представления этих знаний в ЭСУ РВ.

Информация о поведении установки в традиционных технологических режимах получена от экспертов, в качестве которых выступали технологи и операторы, имеющие большой опыт управления воздуходелительной установкой в условиях реального производства. На начальном этапе общения с экспертами были выявлены ключевые понятия, отношения и характеристики, необходимые для описания процесса управления установкой, а также определены типы ограничений, накладываемых на выходные и варьируемые переменные. Беседы проводились с помощью так называемого метода статистических параметров, когда эксперт выступал в роли статистически усредненного информизирующего.

Полученные во второй главе знания о статических и динамических свойствах установки, особенностях различных ОДУ обсуждались и уточнялись во время бесед с экспертами. В результате этого были выявлены и уточнены диапазоны изменения варьируемых переменных, величины шагов, с которыми они могут изменяться в процессе перевода, а также сами процедуры перевода для технологических режимов, соответствующих всему спектру изменения производительности.

Особого внимания заслуживают экспертные знания о поведении установки в переходных режимах, в первую очередь при пуске и остановке, а также знания о возможности ее совместной работы с другими установками на коллектор по продуктам разделения. Эти знания позволили снизить уровень допустимых ограничений по качеству технического кислорода в процессе перевода с $y_K^D = 99,5\% \text{ O}_2$ до $y_K^D = 99,2\% \text{ O}_2$, а по качеству чистого азота с $y_A^D = 0,0005\% \text{ O}_2$ до $y_A^D = 0,0007\% \text{ O}_2$. В связи с этим стали несущественными сделанные на с. 8 замечания о недостатках процесса перевода, представленного на рис. 3 и такой перевод стал допустимым.

С точки зрения экспертов, выходные переменные установки, т.е. концентрации целевых продуктов, можно охарактеризовать качественными понятиями. Так, концентрация кислорода бывает “низкой” ($y_K < 99,2\% \text{ O}_2$), “средней” ($99,2\% \text{ O}_2 \leq y_K < 99,5\% \text{ O}_2$) и “высокой” ($y_K \geq 99,5\% \text{ O}_2$). Аналогично концентрация азота может быть “низкой” ($y_A > 0,0007\% \text{ O}_2$), “средней” ($0,0005\% \text{ O}_2 < y_A \leq 0,0007\% \text{ O}_2$) и “высокой” ($y_A \leq 0,0005\% \text{ O}_2$).

Полученные “гибридные” знания позволили все пространство, в котором изменяются значения управляющих воздействий, разбить на подобласти, соответствующие разным комбинациям качественных характеристик целевых продуктов.

Например, на рис. 4 представлены две большие области изменения управляющих воздействий V_B и $G_{\text{ФЛ}}^{\text{Ч}}$, реализация которых, при фиксированном значении $G_{\text{ФЛ}}^{\text{Г}}$, позволяет получать целевые продукты различного качества на установке, работающей в режиме 2. Здесь затененная часть рисунка называется расширенной областью допустимых управлений, которая включает в себя обычную ОДУ (подобласть с номером 1) и дополнительные ОДУ (подобласти с номерами 2 – 4). Незатененная часть (подобласти с номерами 5 – 9) характеризует недопустимую область, для которой характерно нарушение качества продуктов разделения хотя бы по одному из них.

Выделенным подобластям в пространстве изменения управляющих воздействий соответствуют качественные характеристики продуктов, приведенные в таблице.

Построен древовидный граф целей, аккумулировавший в себе все знания об управлении установкой, извлеченные как от экспертов, так и из информации, полученной при математическом моделировании.

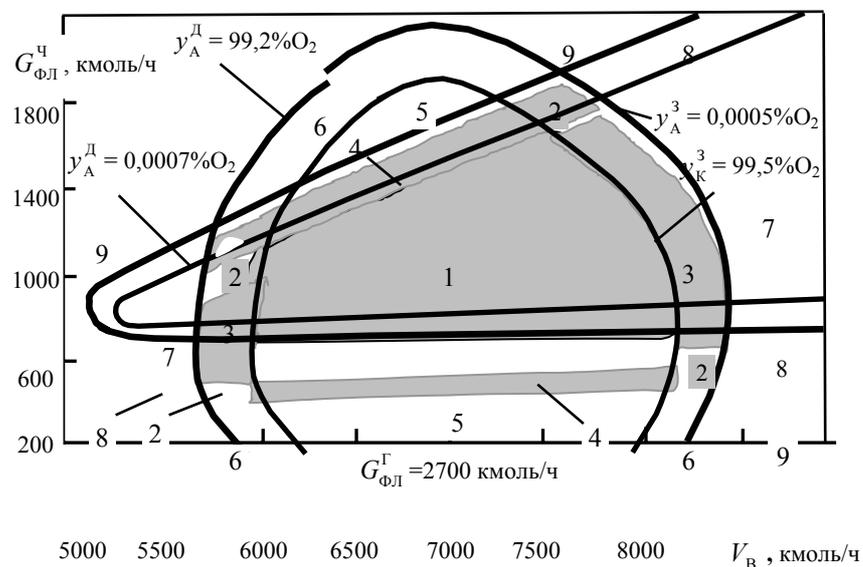


Рис. 4 “Гибридные” знания об областях изменения управляющих воздействий для режима 2

Таблица

Номер подобласти	Качественные характеристики продуктов

1	Концентрация технического кислорода y_K высокая Концентрация чистого азота y_A высокая
2	Концентрация технического кислорода y_K средняя Концентрация чистого азота y_A средняя
3	Концентрация технического кислорода y_K средняя Концентрация чистого азота y_A высокая
4	Концентрация технического кислорода y_K высокая Концентрация чистого азота y_A средняя
5	Концентрация технического кислорода y_K высокая Концентрация чистого азота y_A низкая
6	Концентрация технического кислорода y_K средняя Концентрация чистого азота y_A низкая
7	Концентрация технического кислорода y_K низкая Концентрация чистого азота y_A высокая
8	Концентрация технического кислорода y_K низкая Концентрация чистого азота y_A средняя
9	Концентрация технического кислорода y_K низкая Концентрация чистого азота y_A низкая

С его помощью в ЭСУ РВ по сведениям о процессе перевода, поступающим с установки, и по информации, хранящейся в системе, в определенные моменты времени происходит идентификация текущего состояния объекта. Это состояние соответствует положению рабочей точки в некоторой подобласти пространства изменения управляющих воздействий. Затем определяется и реализуется необходимое управляющее воздействие или отбор целевого продукта, которые характеризуются тремя качественными уровнями: “слабое”, “среднее” и “сильное”. Каждой из этих характеристик по всем варьируемым переменным соответствует определенным образом выбранный диапазон. По окончании переходных процессов в установке вновь идентифицируется ее состояние, определяется и реализуется варьируемая переменная и так до тех пор, пока не будет достигнут искомый режим потребления.

Фрагмент графа целей представлен на рис. 5, при этом для дуг использованы следующие сокращения: Н – низкая; С – средняя; В – высокая; НЗ – не изменялся; ИЗ – изменялся; увелич. – увеличить; уменьш. – уменьшить; до опт. знач. – изменить до оптимального значения.

Рис. 5 Фрагмент древовидного графа целей

Для представления извлеченных знаний, с целью их применения в ЭСУ РВ, выбрана продукционная модель, в которой знания описываются в виде правил “условие – действие” и используется цепочка обратного логического вывода.

Ниже в качестве примера приведено одно из таких правил, в котором перед выбором “действия” в “условии”, кроме идентификации состояния, проводится также проверка ряда дополнительных условий:

ЕСЛИ: концентрация технического кислорода средняя и концентрация чистого азота средняя и разность заданного и текущего отбора азота равна нулю и разность заданного и текущего отбора кислорода больше нуля,
ТО: расход воздуха увеличить средне.

Таким образом, разработана совокупность правил продукций, реализация которых позволит переводить установку во всех исследованных случаях.

В четвертой главе приведено описание ЭСУ РВ ВРУ, как составной части автоматизированной системы управления установкой, функционирующей в режиме переменной производительности.

На основе проведенного анализа инструментальных средств, используемых при построении ЭСУ РВ, выбрана среди них оболочка для разрабатываемой экспертной системы, в наилучшей степени обеспечивающая решение задач управления установкой в процессе ее перевода с режима на режим. При выборе инструментальной среды имело также значение то, насколько проста среда в обращении, как быстро можно овладеть методикой работы с ней, а также возможность органичного сопряжения с уже существующей автоматизированной системой управления.

Структура ЭСУ РВ воздухоразделительной установкой, ядром которой является разработанная база знаний, представлена на рис. 6. В дополнении к эксперту и когнитологу (специалисту по знаниям), обязательно участвующим при разработке базы знаний любой ЭС, добавлен, так называемый имитатор. В качестве него выступает исследователь, проводивший с помощью математических моделей изучение установки в технологических режимах, отличных от тех, которые изучены экспертами. Экспертная система, используя поступающую с объекта текущую информацию, вырабатывает решения. Эти решения воспринимаются в качестве совета оператором, непосредственно управляющим установкой, который, собственно, и является ее пользователем.

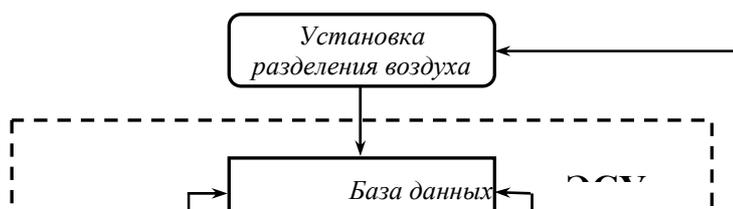


Рис. 6 Структурная схема ЭСУ РВ ВРУ

В приложение вынесен акт опытно-промышленного испытания результатов научно-исследовательской работы (НИР), проведенной сотрудниками кафедры “Информационные технологии в проектировании” Тамбовского государственного технического университета на ОАО “Новолипецкий металлургический комбинат”.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Разработан подход, позволяющий создавать экспертные системы управления технологическими объектами, работающими при переменном потреблении их продукции, который основан на “гибридных” знаниях, включающих как экспертные знания о традиционных режимах функционирования объектов, так и знания, полученные с помощью математического моделирования в других возможных технологических режимах.

2 Извлечены знания из полученной от экспертов информации о работе ВРУ в режимах, соответствующих номинальной и близкой к номинальной производительностям по продуктам разделения, которые использованы при построении базы знаний ЭСУ РВ.

3 Извлечены знания из информации, полученной в результате проведения вычислительных экспериментов на математических моделях ВРУ, характеризующие работу установки в режимах, отличных от номинального и близких к нему, которые использованы при построении базы знаний ЭСУ РВ.

4 При математическом моделировании, наряду с разработанными ранее математическими моделями отдельных аппаратов, входящими в состав моделей ВРУ, использована модифицированная математическая модель регенератора, благодаря чему сокращаются общие вычислительные затраты при проведении “машинных экспериментов”.

5 Выбрана производственная модель представления знаний, полученных от экспертов и в результате математического моделирования, как наиболее эффективная для базы знаний создаваемой ЭСУ РВ.

6 Разработана база знаний, представляющая собой совокупность сформулированных производственных правил с обратной цепочкой логического вывода.

7 Использование ЭСУ РВ позволит осуществить на практике переход от работы установки только в номинальном или близком к нему режимам к фактическому функционированию, обеспечивающему адекватное реагирование на изменение спроса потребителей. Такая работа, которая ранее была просто невозможна, приведет к значительному сокращению прямых потерь электроэнергии на выпуск “ненужных” продуктов разделения воздуха, а, следовательно, к снижению себестоимости получаемой продукции.

Основное содержание диссертационной работы изложено

в следующих публикациях:

- 1 Дестабилизационное управление воздухооразделительной установкой низкого давления / Ю.К. Букурако, Ю.В. Кулаков, Ю.Ф. Мартемьянов, В.Н. Шамкин // Труды ТГТУ: сб. науч. статей молодых ученых и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2000. Вып. 5. С. 92 – 96.
- 2 Методология разработки систем дестабилизационной оптимизации / Ю.К. Букурако, В.И. Бодров, Ю.Ф. Мартемьянов, В.Н. Шамкин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-14: сб. тр. XIV Междунар. науч. конф. В 6 т. Секц. 2, 5 / Смолен. филиал МЭИ (техн. ун-та). Смоленск, 2001. Т. 2. С. 10 – 12.
- 3 Букурако, Ю.К. О разработке экспертной системы управления реального времени воздухооразделительной установкой низкого давления / Ю.К. Букурако, Ю.Ф. Мартемьянов, В.Н. Шамкин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-15: сб. тр. XV Междунар. науч. конф. В 10 т. Секц. 11 / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2002. Т. 6. С. 114 – 115.
- 4 Букурако, Ю.К. Реализация алгоритмов перевода воздухооразделительной установки экспертной системой / Ю.К. Букурако, Ю.В. Кулаков, В.Н. Шамкин // Новые информационные технологии и системы (NITS'2002): тр. V Междунар. науч.-техн. конф. / Пенз. гос. ун-т. Пенза, 2002. С. 24 – 26.
- 5 Разработка экспертной системы управления воздухооразделительной установкой КА-32 / Ю.К. Букурако, Ю.В. Кулаков, Ю.Ф. Мартемьянов, В.Н. Шамкин // Труды ТГТУ: сб. науч. статей молодых ученых и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2003. Вып. 13. С. 135 – 141.
- 6 Букурако, Ю.К. Формирование базы знаний для экспертной системы управления воздухооразделительной установкой низкого давления / Ю.К. Букурако, Ю.В. Кулаков, В.Н. Шамкин // VIII науч. конф. ТГТУ: пленарные докл. и краткие тез. 23 – 24 апреля 2003 г. / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2003. Ч. 1. С. 90 – 91.
- 7 Приобретение и извлечение знаний при построении экспертной системы управления воздухооразделительной установкой / Ю.К. Букурако, И.А. Зауголков, Ю.В. Кулаков, Ю.Ф. Мартемьянов // IX науч. конф. ТГТУ: пленарные докл. и краткие тез. 29 – 30 апреля 2004 г. / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2004. С. 83 – 84.
- 8 Выбор инструментального средства при построении экспертной системы управления воздухооразделительной установкой / Ю.К. Букурако, И.А. Краснов, С.А. Чернокозинский, В.Н. Шамкин // IX науч. конф. ТГТУ: пленарные докл. и краткие тез. 29 – 30 апреля 2004 г. / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2004. С. 84.
- 9 Структурирование знаний для экспертной системы управления воздухооразделительной установкой низкого давления / Ю.К. Букурако, Ю.В. Кулаков, С.А. Чернокозинский, В.Н. Шамкин // Труды ТГТУ: сб. науч. статей молодых ученых и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2004. Вып. 15. С. 159 – 161.

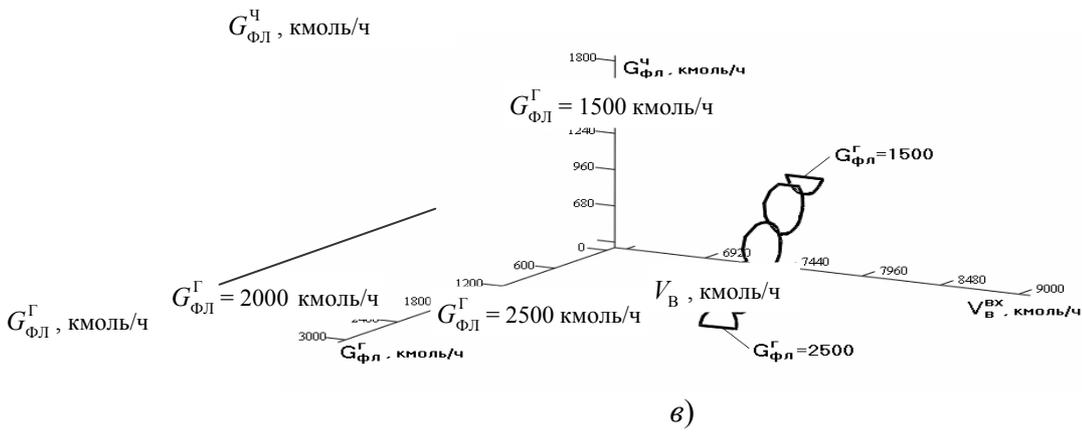
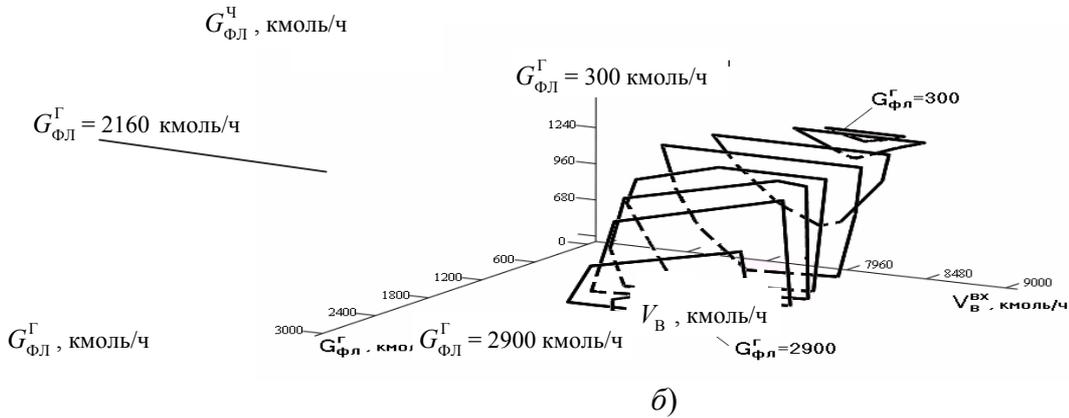
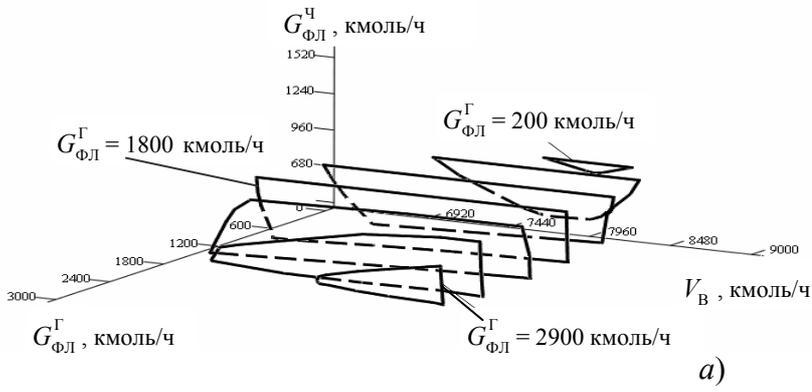


Рис. 2 Знания о режимах 1, 5, 6

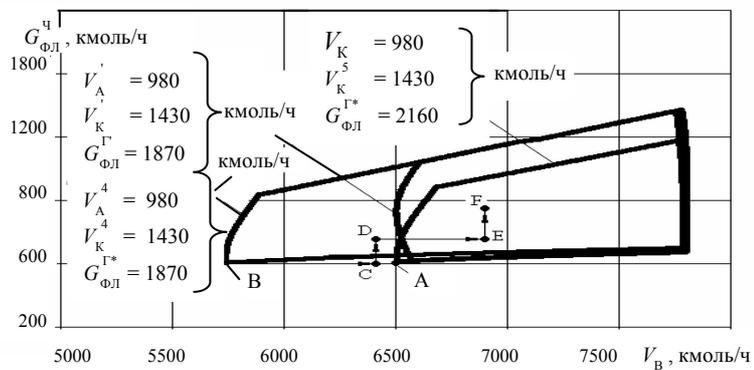


Рис. 3 Знания о переводе установки с режима 4 на режим 5

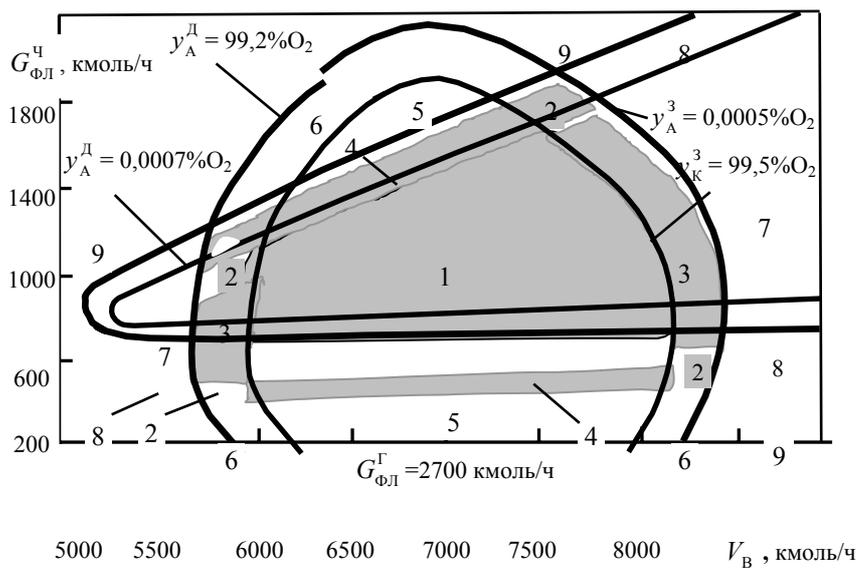


Рис. 4 «Гибридные» знания об областях изменения управляющих воздействий для режима 2

