

МОДЕЛЬ АЛГОРИТМА ОГРАНИЧИВАЮЩЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО КОМПРЕССОРА

A MODEL OF THE ALGORITHM FOR LIMITING REGULATION OF A GAS TURBINE COMPRESSOR

R. Syrovatkin

Summary. To summarize, we note that the existing algorithms of automatic control systems are characterized by complexity and uniqueness, due to their development for specific technological installations. In order to solve certain regulatory problems in the gas industry, in the context of this study, an approach to the development of a simplified algorithm aimed at solving the problem of compensation for integral saturation is proposed. The essence of such a problem boils down to the fact that when certain parameters are reached with integral saturation, the control system becomes equivalent to an open system, which can lead to failure or disruption of the normal functioning of individual equipment and the thermal system as a whole. The model proposed and modeled in VisSim shows that the basis for the development of a simplified algorithm should be based on combining the principle of choosing the minimum impact and the principle of saturation compensation in one scheme. Only under the specified conditions will the necessary operating parameters be achieved and the main task of management in the process of regulation will be solved — maintaining maximum equipment performance with planned or forced limitation of one or more parameters.

The algorithm developed in the article is universal and can be adapted to the process of controlling any technological equipment where maximum performance is required while limiting key operating parameters.

Keywords: simplified algorithm, limiting regulation, gas turbine compressor, saturation compensation, integral saturation.

Сыроваткин Роман Андреевич

Волжский политехнический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Волгоградский государственный
технический университет»
Roman150190@mail.ru

Аннотация. В статье автор делает вывод о том, что существующие алгоритмы систем автоматического управления характеризуются сложностью и уникальностью ввиду их разработки под конкретные технологические установки. Для решения отдельных задач регулирования в газовой отрасли в контексте настоящего исследования предложен подход к разработке упрощенного алгоритма, ориентированного на решение проблемы с компенсацией интегрального насыщения. Суть такой проблемы сводится к тому, что при достижении отдельных параметров при интегральном насыщении система управления становится эквивалентной разомкнутой системе, что может привести к сбою или нарушению нормального функционирования отдельного оборудования и тепловой системы в целом. Предложенная и смоделированная в VisSim модель показывает, что в основу разработки упрощенного алгоритма необходимо заложить объединение в одной схеме принципа выбора минимального воздействия и принципа компенсации насыщения. Только при заданных условиях будут достигнуты необходимые параметры работы и будет решена основная задача управления в процессе регулирования — поддержание максимальной производительности оборудования при запланированном или вынужденном ограничении одного или нескольких параметров.

Разработанный в статье алгоритм является универсальным и может быть адаптирован под процесс управления любым технологическим оборудованием, где требуется максимальная производительность при ограничении ключевых рабочих параметров.

Ключевые слова: упрощенный алгоритм, ограничивающее регулирование, газотурбинный компрессор, компенсация насыщения, интегральное насыщение.

В процессах регулирования технологического оборудования одной из задач управления является поддержание максимальной производительности оборудования при запланированном или вынужденном ограничении одного или нескольких параметров [3, 4, 9]. При этом наиболее сложной является задача по ограничению нескольких параметров. Специфика такой задачи заключается в том, что ограничению подвергаются несколько разнородных величин со своими передаточными функциями, заведенными на один исполнительный механизм. Исходя из этого, в алгоритме регулятора должен быть предусмотрен соответствующий переключатель режима управления [5, 6].

Рассмотрим поставленную задачу на примере регулирования конкретного технологического оборудования — газотурбинного компрессора. В движение компрессор приводит газотурбинный двигатель. С позиции технологического процесса и обеспечения оптимальной задачи управления должна быть достигнута максимальная производительность компрессора. При этом установлены предельно допустимые максимальные значения таких параметров, как: скорость вала, температура выхлопных газов, давление и другие параметры, влияющие на достижение максимальной производительности. Превышение таких предельно допустимых максимальных значений невозможно. Органом управления компрессора будет топливный кран.

При достижении любым из параметров максимально допустимого значения, повышение подачи топлива прекращается и регулирование переходит на эту величину. Остальные параметры остаются заведомо меньше максимальной величины, достигнутой одним или несколькими параметрами. При повышении значений параметров до максимальных, технический персонал, обслуживающий оборудование (в данном примере компрессор), использует термин «встало на лимит». При этом встать на лимит компрессор может как по температуре, так и по давлению, и по оборотам, и по выхлопным газам, и по другим параметрам.

Когда режим работы меняется, любой из параметров, обеспечивающих работу компрессора, может достичь ограничения и компрессор «встанет на лимит» по другой величине. Например, на одном режиме работы газотурбинные компрессоры будут иметь лимит по оборотам, а на другом режиме работы лимит по температуре. Так, в алгоритме системы автоматического управления (далее — САУ) газотурбинных установок предусматривается специальный блок «LV GATE», в котором допустимо

осуществить выбор минимального значения управляющего воздействия регулятора. На рисунке 1 изображен пример регулирования газотурбинной установки.

На рисунке 1 приведен элементарный алгоритм САУ, раскрывающий процесс управления регулятором. Реальные алгоритмы САУ довольно сложны и разрабатываются для конкретных технологических установок. Учитывая сложность реальных алгоритмов САУ, достаточно актуальной научной задачей видится разработка упрощенного алгоритма для различных задач регулирования [2, 5].

Вместе с тем, для разработки упрощенного механизма необходимо решение проблемы с компенсацией насыщения. В установившемся для газотурбинной установки режиме регулирования будет являться линейным пропорционально-интегрально-дифференцирующим (далее — ПИД) регулированием. Однако в момент выхода на уставку и при переключении режима управления появляется интегральное насыщение ПИД регуляторов. Суть проблемы интегрального насыщения ПИД регуля-

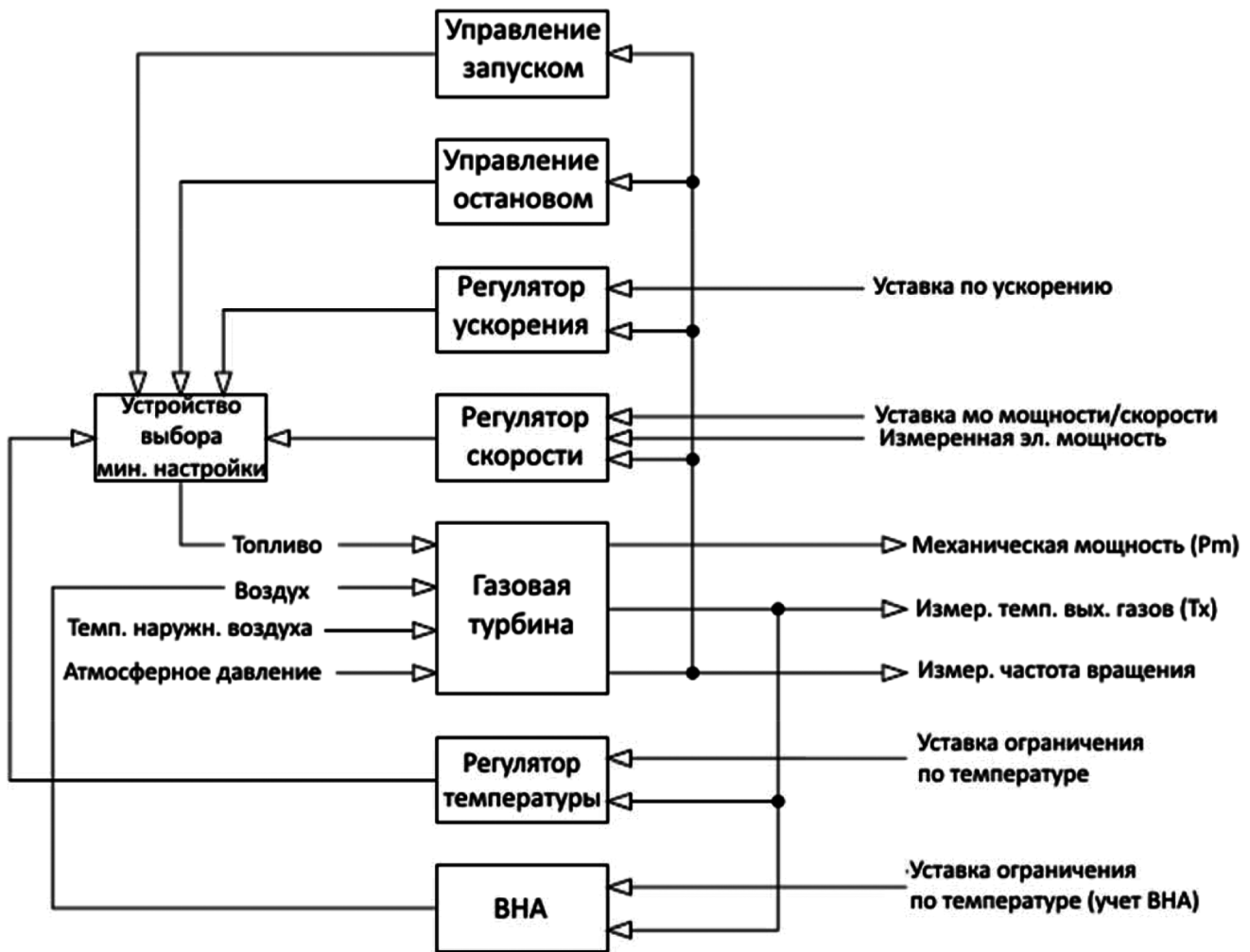


Рис. 1. Пример регулирования газотурбинной установки

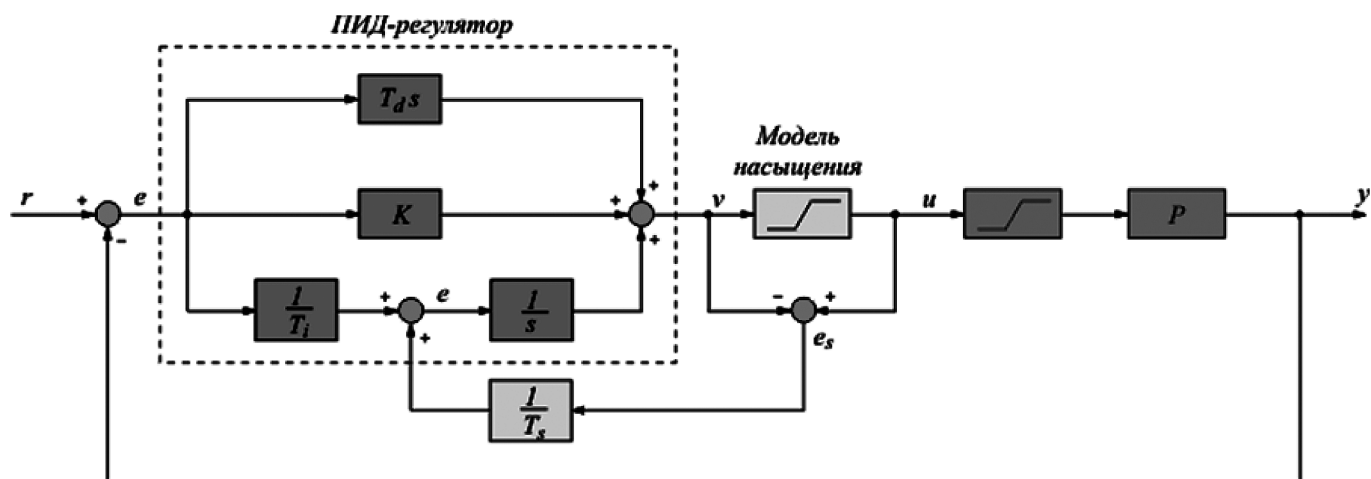


Рис. 2. Компенсация эффекта интегрального насыщения с помощью дополнительной обратной связи для передачи сигнала ошибки e_s на вход интегратора

торов заключается в том, что при достижении отдельных параметров такого насыщения система управления становится эквивалентной разомкнутой системе, что может привести к сбою или нарушению нормального функционирования тепловой системы [1, 7, 8].

Эффект интегрального насыщения можно ослабить, используя дополнительную обратную связь, отслеживающую выходную величину регулятора. Структура системы с таким компенсатором наглядно проиллюстрирована в работе [10] и показана на рисунке 2.

Принцип работы системы, представленной на рисунке 2, заключается в выработке в системе сигнала рассогласования между входом и выходом исполнительного устройства: $e_s = u - v$ [10]. Сигнал на выходе исполнительного устройства либо измеряют, либо вычисляют, используя математическую модель, представленную на рисунке 2. Так, если сигнал ошибки $e_s = 0$, то компенсация эффекта интегрального насыщения не осуществляется, поскольку имеет место быть обычное линейное ПИД-регулирование.

При наличии интегрального насыщения сигнал ошибки $e_s < 0$, а $v > u$. При указанных значениях сигнал на входе интегратора уменьшается на величину ошибки, что приводит к замедлению роста сигнала на выходе, уменьшению сигнала рассогласования и величины выброса на переходной характеристике системы. Постоянная времени T_s , обозначенная в модели, представленной на рисунке 2, определяет степень компенсации сигнала рассогласования.

Для разработки упрощенного алгоритма необходимо объединение в одной схеме принципа выбора минимального воздействия и принципа компенсации насыщения. На рисунке 3 представлена упрощенная модель двух контуров газового компрессора.

В представленной на рисунке 3 модели «Y1», «Y2» — это регулируемые параметры компрессора; «r1», «r2» — это уставки; «R1», «R2» — ПИД регуляторы; «U1», «U2» — выходные величины ПИД регуляторов; «U» — результирующая выходная величина; «P» — объект; «W1», «W2» — передаточные функции объекта.

Теперь акцентируем внимание на описании работы технологического оборудования при использовании упрощенной модели. Количество контуров соответствует количеству входов — управляемых параметров. ПИД регуляторы работают параллельно. Если сделать предположение о том, что в процессе работы один из параметров объекта управления «Y1» достиг заданной уставки, то выходное воздействие ПИД регулятора «R1», отвечающего за эту величину, «U1» начнёт убывать. В то же время «U2» продолжит возрастать, так как «Y2» ниже заданной уставки.

Результирующий выход регуляторов будет равен минимальному значению из двух. Таким образом, «U» = «U1», «Y1» = «r1», «U2» > «U», «Y2» < «r2». На второй регулятор в это время будет действовать компенсация насыщения, не давая ему бесконечно возрастать. В результате регулирование осуществляется по параметру «Y1», который поддерживается максимальным, то есть объект управления «становится на лимит» по этому параметру.

Имея описание работы технологического оборудования при использовании упрощенной модели, продемонстрируем работу алгоритма, ограничивающего регулирование в программе «VisSim». При составлении схемы в программе «VisSim» коэффициенты передаточных функций и постоянные времени были подобраны случайно ввиду их необходимости для демонстрации работы алгоритма. Модель для двух контуров в «VisSim» представлена на рисунке 4 и содержит следующие переменные: «in» — задающее воздействие; «U1», «U2» — вы-

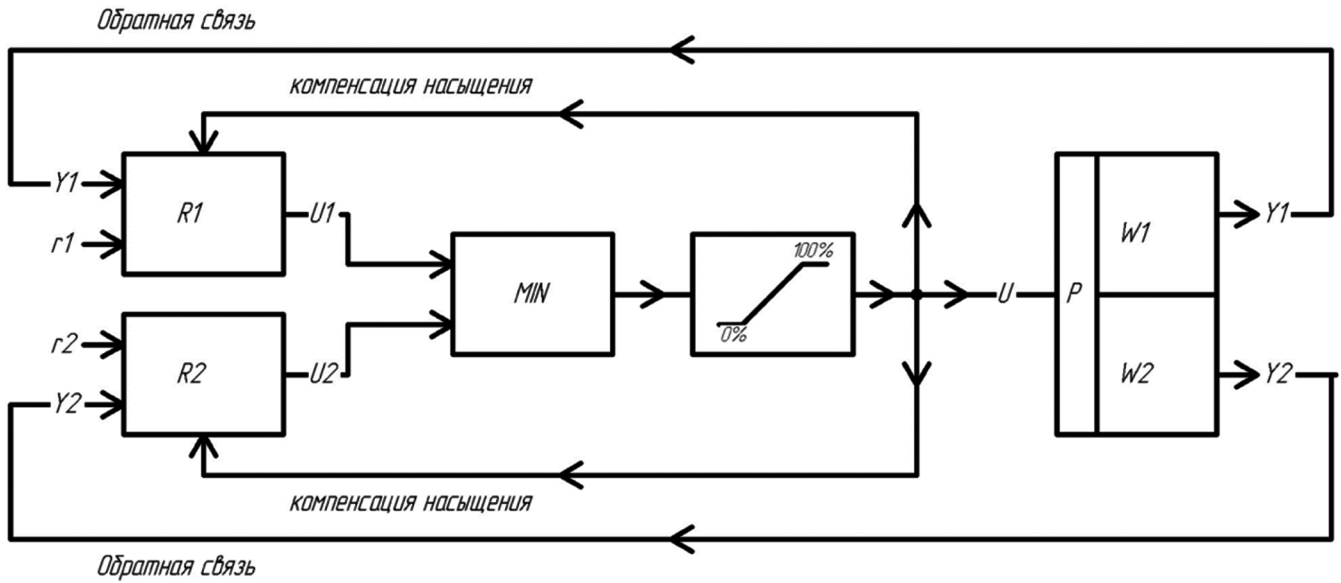


Рис. 3. Упрощённая модель для двух контуров

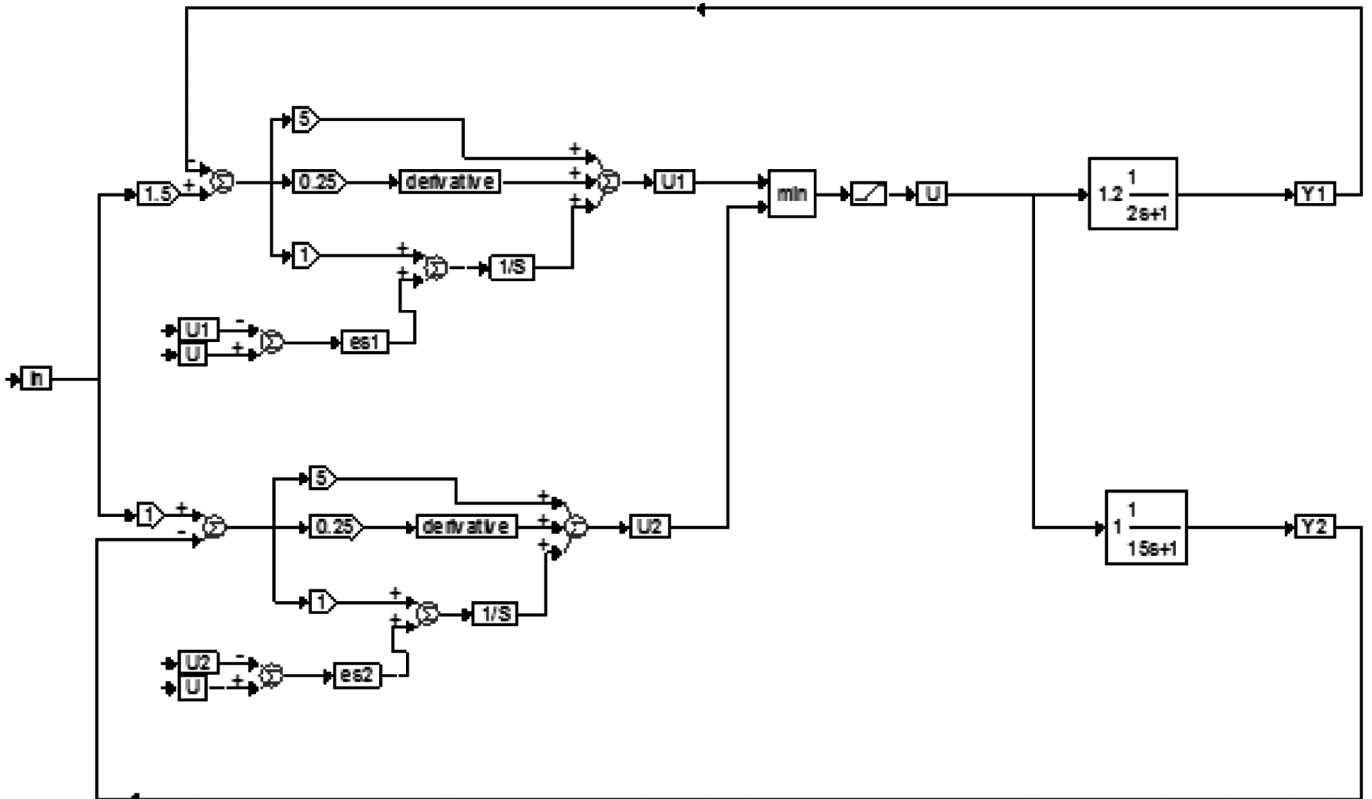


Рис. 4. Модель для двух контуров в VisSim

ходные величины ПИД-регуляторов; «U» — результирующая выходная величина; «Y1», «Y2» — регулируемые параметры; «es1», «es2» — компенсация насыщения.

Модель работы задающего воздействия представлена на рисунке 5.

Задающее воздействие представляет собой два ступенчатых воздействия: «+1» через одну секунду, «-0,5»

через 50 секунд, сглаженных фильтром. Что касается регулируемых параметров «Y1», «Y2» (рисунок 6), то «Y1» достигает ступени в «1.5», при этом регулирование происходит по параметру «Y1» примерно до 20 секунд.

При подходе «Y2» к ступени в «1.0» второй регулятор снижает выходное воздействие, а регулирование переключается на «Y2», при этом значение «Y» вынужденно снижается. На 50 секунде ступень снижается «1.0»

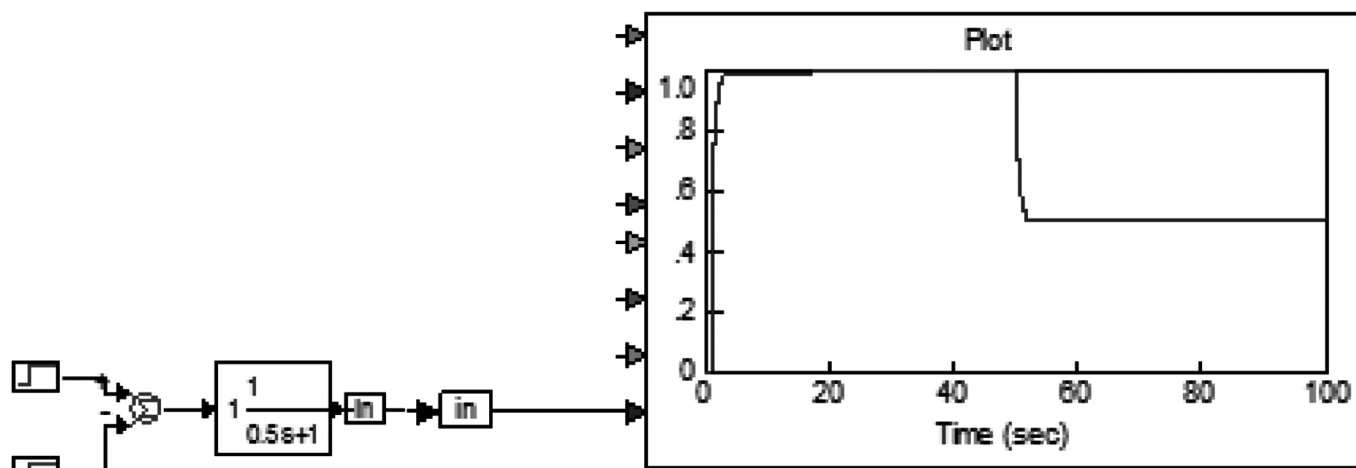


Рис. 5. Задающее воздействие «in»

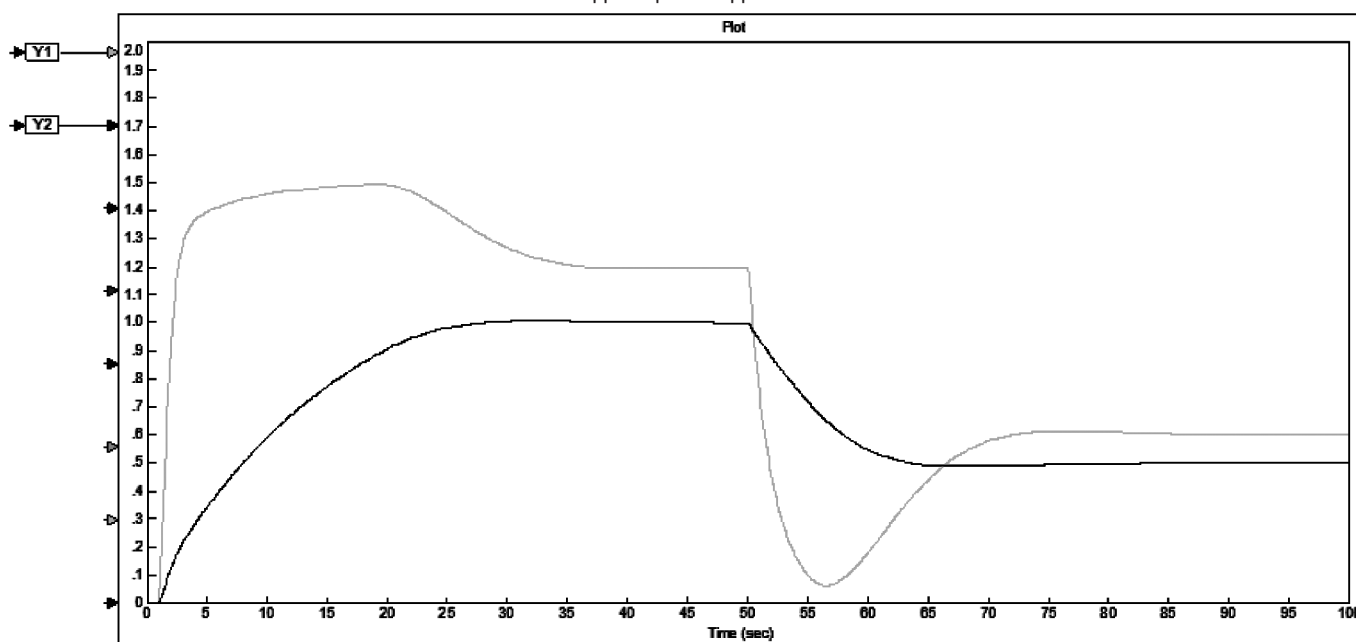


Рис. 6. Регулируемые параметры «Y1», «Y2»

до «0.5», а регулирование происходит по параметру «Y2», так как он значительно выше уставки в «0.5». На рисунке 7 представлено управляющее воздействие выходных величин «U1», «U2», «U».

Как видно из данных, представленных на рисунке, 7 «U» соответствует минимальному из «U1», «U2» с учетом ограничения насыщения регулятора от «0.0 до 2.0». Что касается компенсации насыщения, то она происходит при определенных параметрах (рисунок 8). Так, если «es1» = 0, то происходит линейное ПИД регулирование по «Y1», при «es2» = 0 регулирование осуществляется по параметру «Y2». Как видно из данных, представленных на рисунке 8, на «2» и «50» секунде «es1» и «es2» не равны 0 из-за ограничения «U» моделью насыщения регулятора.

Таким образом, представленный в программе алгоритм демонстрирует работу ограничивающего регулятора, достигающего заданных параметров при использовании упрощенной модели.

Подводя итог, отметим, что существующие алгоритмы систем автоматического управления характеризуются сложностью и уникальностью ввиду их разработки под конкретные технологические установки. Для решения отдельных задач регулирования в газовой отрасли в контексте настоящего исследования предложен подход к разработке упрощенного алгоритма, ориентированного на решение проблемы с компенсацией интегрального насыщения. Суть такой проблемы сводится к тому, что при достижении отдельных параметров при интегральном насыщении система управления становится эквивалентной разомкнутой системе, что может

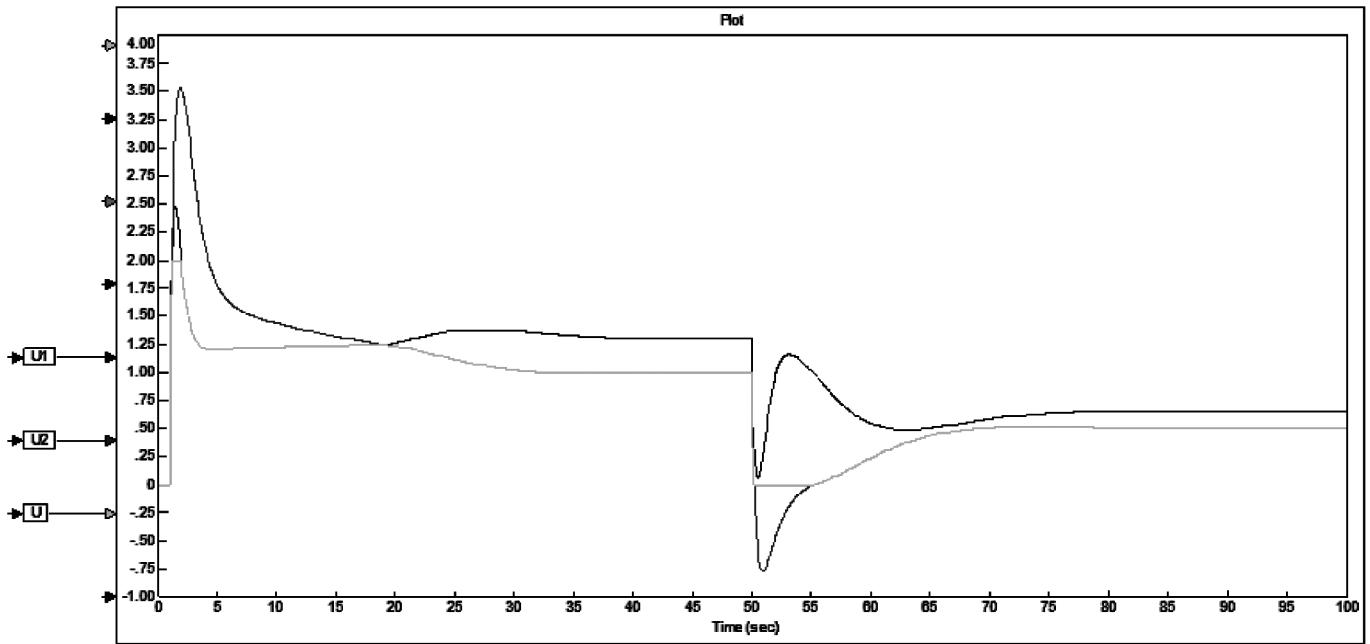


Рис. 7. Управляющее воздействие выходных величин «U1», «U2», «U»

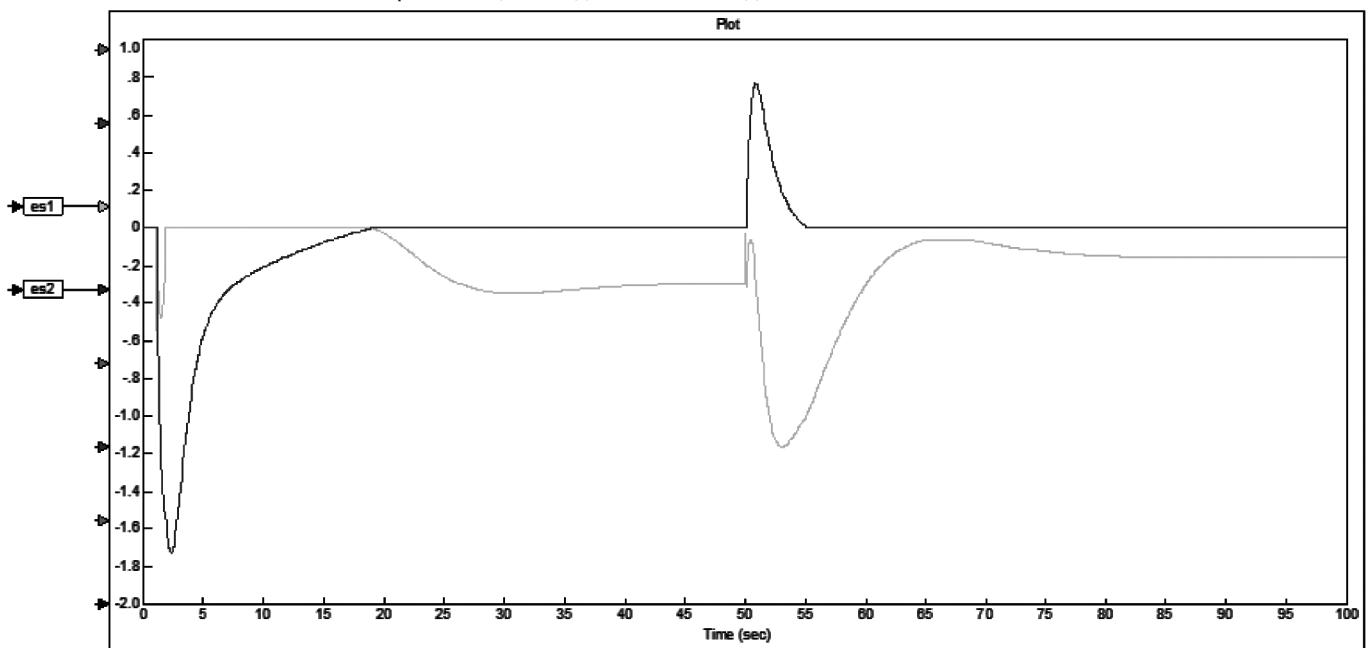


Рис. 8. Компенсация насыщения «es1», «es2»

привести к сбою или нарушению нормального функционирования отдельного оборудования и тепловой системы в целом. Предложенная и смоделированная в VisSim модель показывает, что в основу разработки упрощенного алгоритма необходимо заложить объединение в одной схеме принципа выбора минимального воздействия и принципа компенсации насыщения. Толь-

ко при заданных условиях будут достигнуты необходимые параметры работы и будет решена основная задача управления в процессе регулирования — поддержание максимальной производительности оборудования при запланированном или вынужденном ограничении одного или нескольких параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автомонов С.А. Стельмашук С.В. Системы автоматического регулирования с компенсацией интегрального насыщения // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 4-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 1. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет. 2022. С. 4–6.
2. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями. Учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 108 с.
3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан Моделирование газотурбинной установки с прогностическими регуляторами напряжения и скорости // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №3. С. 60–67
4. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб: Наука, 2000. 549 с.
5. Рыбалев А.Н., Теличенко Д.А., Косицин В.Ю., Ахметшин Р.А., Белоусова А.В. Разработка и исследование алгоритмов и программ управления исполнительными механизмами систем автоматического регулирования // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2012. №57. С. 104–110.
6. Стельмашук С.В., Гурулёв А.А. Подчиненное управление многодвигательным электроприводом с последовательным соединением двигателей постоянного тока с независимым возбуждением // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. №1. С. 403–411.
7. Фуртат И.Б. Динамическая компенсация возмущений в условии насыщения сигнала управления // УБС. 2017. №65. С. 24–40.
8. Astrom, K.J.; Hang, C.C.; Lim, B.C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time. — IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, Issue 2, 1994, p. 343–345.
9. Limit, Selector, and Override Controls. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://control.com/textbook/basic-process-control-strategies/limit-selector-and-override-controls/> (дата обращения: 18.11.2024 г.).
10. Денисенко В.В. Энциклопедия АСУ ТП. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.reallab.ru/bookasutp/> (дата обращения 18.11.2024 г.).

© Сыроваткин Роман Андреевич (Roman150190@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»