

СТАТЬИ

УДК 621.311

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ПАРОГЕНЕРАТОРА**Ананченко И.В., Минчев Н.В., Чумаков С.И., Шишкевич М.В.***ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Санкт-Петербург, e-mail: anantchenko@yandex.ru, minivik@mail.ru, srg_chumakov@mail.ru, shishkevichmariya@mail.ru*

Представлены фрагменты результатов наблюдений технологических режимов парогенератора и их анализ. Мониторинг парогенератора ДКВР-6.5-13 ГМ, управляемого автоматически системой управления «Факел-2010», осуществлялся сотрудниками научно-производственной организации «Уран-СПб». Система «Факел-2010» поддерживает стехиометрическое соотношение сжигаемого газа и воздуха. Фирмой «Уран-СПб» была поставлена задача найти дополнительные возможности для экономии газового топлива. С этой целью была проанализирована выборка, сформированная в процессе мониторинга. Объем выборки 500 записей, формат представления данных MS Excel. Сформулирован экономический критерий оптимальности. Экономический критерий оптимальности определяется как отношение расхода газового топлива к расходу питательной воды, подаваемой в барабан котла. Более правильно было бы брать отношение расхода газового топлива к расходу полученного пара, но так как точное измерение расхода пара вызывает технические сложности, то вместо расхода пара используется расход воды. Принято допущение, что вся подаваемая питательная вода преобразуется в конечном счете в пар. Построены линейная, квадратичная и кубическая оценки множественной функции регрессии для критерия оптимальности в зависимости от управляющих переменных, получены оценки корреляционной матрицы контролируемых параметров. После этого с учетом мультиколлинеарности проведено упрощение модели и найдены соответствующие режимы оптимального расхода газа в зависимости от нагрузки на парогенератор. Предложенная методика анализа может быть использована при управлении и более мощными промышленными парогенераторами.

Ключевые слова: регрессионный анализ, оптимизация, энергосбережение, парогенератор**SEARCH FOR THE OPTIMAL STEAM GENERATOR MODE****Ananchenko I.V., Minchev N.V., Chumakov S.I., Shishkevich M.V.***Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, e-mail: anantchenko@yandex.ru, minivik@mail.ru, srg_chumakov@mail.ru, shishkevichmariya@mail.ru*

The article presents fragments of the results of observations of the technological modes of the steam generator and their analysis. Monitoring of the steam generator DKVR-6.5-13 GM, controlled automatically by the control system "Torch-2010", was carried out by employees of the scientific and production organization "Uran-SPb". The Fakel-2010 system maintains a stoichiometric ratio of the burned gas and air. The company "Uran-SPb" was tasked to find additional opportunities to save gas fuel. For this purpose, the sample formed during the monitoring process was analyzed. The sample size is 500 records, the data presentation format is MS Excel. The economic criterion of optimality is formulated. The economic criterion of optimality is defined as the ratio of the consumption of gas fuel to the consumption of feed water supplied to the boiler drum. It would be more correct to take the ratio of gas fuel consumption to the consumption of the resulting steam, but since accurate measurement of steam consumption causes technical difficulties, water consumption is used instead of steam consumption. It is assumed that all supplied feed water is eventually converted into steam. Linear, quadratic and cubic estimates of the multiple regression function for the optimality criterion depending on the control variables are constructed, estimates of the correlation matrix of the controlled parameters are obtained. After that, taking into account multicollinearity, the model was simplified and the corresponding modes of optimal gas flow were found depending on the load on the steam generator. The proposed method of analysis can be used in the management of more powerful industrial steam generators.

Keywords: automatic control, system, neural network, fuzzy control, marine main engine

Парогенерирующая установка – комплекс оборудования для производства насыщенного пара, который применяется в качестве рабочего тела в паровых машинах, теплоносителя в системе отопления и в технологических процессах различных областей промышленности [1]. Данные установки являются одной из основных частей тепловых станций, которые являются основой электроэнергетики, так как занимают в данной области порядка 70%. При выработке электроэнергии парогенератор выступает в качестве реакторной установки, предназначенной для производ-

ства пара, поступающего на турбогенератор для преобразования тепловой энергии в электрическую [1, 2].

В связи с современной тенденцией, направленной на экологию, в качестве основного вида топлива для топливосжигающих установок применяют газообразные виды топлива. Другой современной тенденцией является эффективное использование ресурсов, поэтому в качестве топлива пытаются использовать попутный газ, получаемый при добыче нефти, в особенности в населенных пунктах, располагающихся вблизи добывающих платформ [2].

Так как ресурсы, применяемые для работы топливосжигающих установок, являются медленно возобновляемыми или невозобновляемыми, а цена на них возрастает с каждым годом, то встает задача поиска дополнительных возможностей для экономии газового топлива. Одно из решений данной задачи основано на минимизации экономического критерия оптимальности, который можно определить как отношение расхода газового топлива к расходу получаемого пара. Однако вследствие того, что измерение расхода пара с точностью, необходимой для корректировки работы оборудования, связано с техническими сложностями, то вместо расхода пара предлагается использовать расход питательной воды. При этом предполагается, что вся питательная вода, подаваемая в парогенератор, будет преобразована в пар [3]. Используя предложенный критерий оптимальности, описана методика поиска благоприятного решения в зависимости от паровой нагрузки.

Парогенерирующие установки также применяются в современных тепловых сетях, поэтому актуальность решения данной задачи становится выше, особенно для тепловых станций, построенных в районах Крайнего Севера и в арктических регионах, так как на данных территориях особенно высоко потребление тепловых ресурсов. При рациональном сжигании топлива можно получить большой экономический эффект [3–6]. Хотя опубликован достаточно большой объем литературы по разработке, исследованию и принципам работы топливосжигающих установок, в частности есть учебные пособия [3] по парогенераторам, однако вопросы эффективного расходования и экономии ресурсов недостаточно проработаны [4].

С учетом актуальности задачи была сформулирована цель исследования: рассмотреть и проанализировать данные мониторинга на промышленном парогенераторе ДКВР-6.5-13 ГМ (табл. 1) для поиска оптимальных режимов его эксплуатации, с учетом предложенного критерия оптимальности – отношения расхода газа к расходу питательной воды, подаваемой в барабан котла. Таким образом, целевая функция здесь – это зависимость отношения расхода газа к расходу питательной воды, поступающей в барабан котла, от управляющих параметров в процессе образования пара. Задача – найти значения этих параметров, минимизирующих данную функцию. Результаты исследований могут иметь практическую значимость, в частности, при решении задач планирова-

ния деятельности предприятий топливно-энергетического комплекса.

Материалы и методы исследования

По данным мониторинга, предоставленным авторам руководством фирмы Уран-СПб, проведены оценки регрессионных поверхностей критерия в зависимости от управляемых переменных. Данные реального процесса, отсчет велся через каждую минуту. Всего анализировалось 500 отсчетов, данные можно скачать по ссылке [7]. Была поставлена задача найти дополнительные возможности для экономии газового топлива. Для решения поставленной задачи по предоставленным данным построены три модели поверхности множественной регрессии.

Рассматриваемый парогенератор управляется системой «Факел 2010», разработанной фирмой Уран-СПб. Параметры, контролируемые в ходе мониторинга, представлены в табл. 1. В таблице представлен диапазон изменения значений параметров, измеряемых в ходе мониторинга, приведены буквенные обозначения и размерности параметров, используемые фирмой Уран-СПб. В ходе анализа рассматривался 31 дискретный случайный процесс с дискретным временем. Необходимо было построить вероятностные модели и затем, используя сформулированный критерий оптимальности, выбрать наиболее целесообразный, с учетом результатов анализа, метод нахождения оптимума, после чего выполнить нахождение оптимума на основе имеющихся исходных данных.

На рис. 1 и 2 приведены графики фрагментов реализаций случайных процессов – расхода питательной воды, подаваемой в барабан котла и расхода газа, которые являются определяющими для расчета критерия оптимальности.

Из графиков видно, что частота колебаний расхода газа превосходит частоту колебаний расхода воды, что связано с особенностями системы управления «Факел 2010». На рис. 3 показана реализация поведения выбранного критерия оптимальности $F = F_g/F_v$.

Было установлено [4], что колебания критерия происходят в диапазоне от 3.08 до 11.91, а отношение максимального значения к минимальному составляет 3.9, что дает основания искать наиболее экономичные режимы паробразования. В ходе выполнения анализа было выявлено, что критерий оптимальности зависит от множества параметров, но большинство из них остаются постоянными и их можно исключать из рассмотрения.

Таблица 1

Описание данных мониторинга – 31 параметр,
контролируемый в процессе образования пара

№	Описание измеряемого параметра	Обозначение	Минимум	Максимум
1	Температура воды на входе, °С	Т _{вв}	0	180
2	Температура воды после экономайзера, °С	Т _{вэ}	0	180
3	Давление воды после экономайзера, кг/см ²	Р _{вэ}	0	10
4	Расход воды, м ³ /ч	F _в	0	10
5	Положение исполнительного механизма воды, %	ИМП	0	100
6	Уровень воды в барабане котла, мм	Л _б	0	100
7	Давление пара в барабане, кг/см ²	Р _{пб}	0	16
8	Расход пара, т/ч	F _п	0	15
9	Температура воздуха на горение, °С	Т _{нв}	-50	50
10	Частота электропитания вентилятора, Гц	f _{вент}	0	60
11	Положение исполнительного механизма воздуха, %	ИМВ	0	100
12	Давление воздуха общее, кПа	Р _{во}	0	250
13	Давление воздуха в горелке 1 (левой), кПа	Р _{вл}	0	250
14	Давление воздуха в горелке 2 (правой), кПа	Р _{вп}	0	250
15	Расход газа, м ³ /час	F _г	0	2000
16	Температура газа, °С	Т _г	-20	40
17	Положение исполнительного механизма газа, %	ИМГ	0	100
18	Давление газа, общее, кг/см ²	Р _{го}	0	10
19	Давление газа, перед горелками, кг/см ²	Р _{гг}	0	10
20	Давление газа в горелке 1 (левой), кг/см ²	Р _{гл}	0	5
21	Давление газа в горелке 2 (правой), кг/см ²	Р _{гп}	0	5
22	Разрежение в топке котла, Па	Р _{тк}	-250	250
23	Содержание оксида углерода, ppm (промили)	СО	0	2000
24	Содержание кислорода после котла, %	O _{2к}	0	15
25	Содержание кислорода после экономайзера, %	O _{2э}	0	15
26	Разрежение в дымоходе после котла, кПа	Р _{дк}	0	2.5
27	Температура дымовых газов после котла, °С	Т _{дк}	50	500
28	Температура дымовых газов после экономайзера, °С	Т _{дэ}	50	400
29	Частота электропитания дымососа, Гц	f _{дым}	0	60
30	Положение исполнительного механизма разрежения, %	ИМТ	0	100
31	Разрежение в дымоходе после экономайзера, кПа	Р _{дэ}	0	2.5

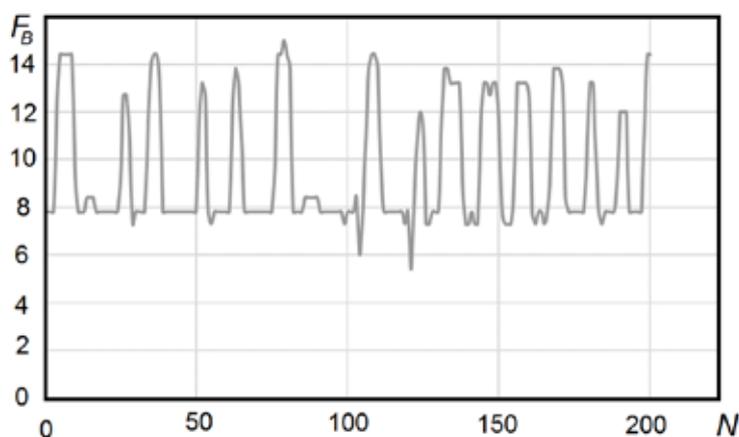


Рис. 1. График реализации случайного процесса расхода воды по первым начальным значениям от 1 до 200 (N – номер отсчета)

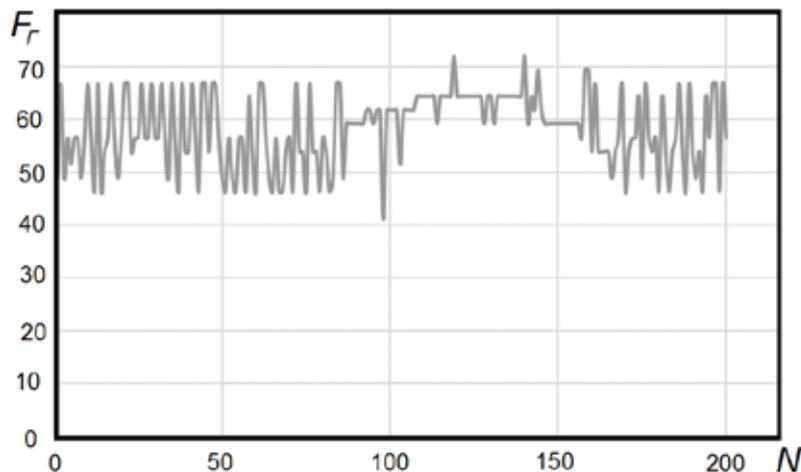


Рис. 2. График реализации случайного процесса расхода газа (N – номер отсчета)

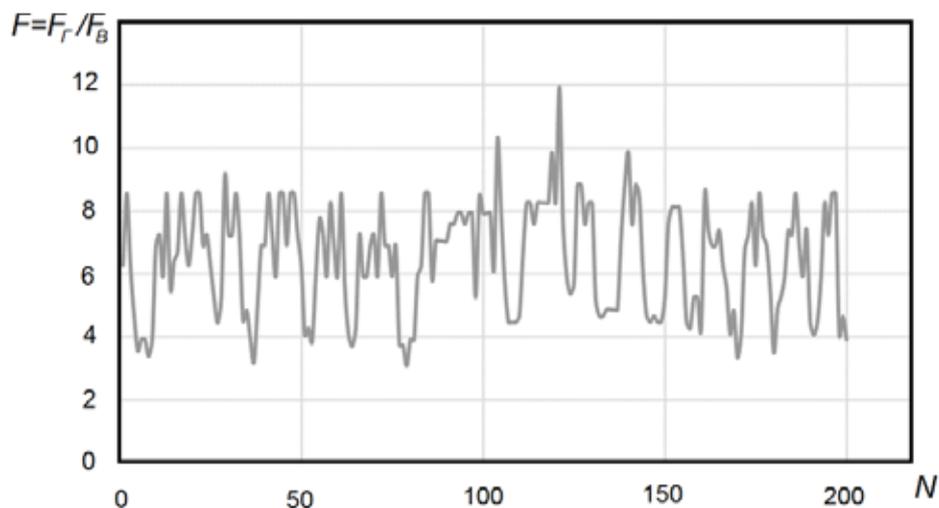


Рис. 3. Графическое представление реализации случайного процесса отношения расхода газа к расходу воды (N – номер отсчета)

В общем виде для поиска оптимального решения требуется отобразить пространство всех контролируемых переменных на множество значений критерия оптимальности. Отображение строится методом наименьших квадратов (МНК) в форме оценки множественной регрессии [4]. Однако в такой постановке размерность пространства параметров высока, и для практического решения требуется уменьшить эту размерность. Задачу можно упростить, выявив наиболее значимые управляющие параметры (в нашем случае выделено четыре таких параметра):

1. ИМП (x_1) – положение заслонки, управляющей расходом воды (% открытия).
2. Фвент (x_2) – частота оборотов вентилятора, подающего воздух на газовые горелки (Гц).

3. ИМГ (x_3) – положение заслонки, управляющей расходом газа (% открытия).

4. Фдым (x_4) – частота оборотов дымососа, создающего тягу в выхлопной трубе (Гц).

Два управляющих параметра – положение заслонок на воздух и дымосос – по 500 наблюдениям оставались неизменными, поэтому в расчет не принимались. Таким образом составлено уравнение для оценки функции регрессии в зависимости от четырех переменных. В ходе анализа выяснилось, что есть сильная корреляция между параметрами, что приводит к проблеме мультиколлинеарности. Чтобы избавиться от этой проблемы, задачу упростили.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Была проведена оценка корреляционной зависимости всех параметров. В табл. 2 приведены оценки коэффициентов корреляции только управляющих параметров и выбранного критерия оптимальности F.

Таблица 2

Оценка корреляционной матрицы управляющих параметров и критерия оптимальности

	ИМП	F _{вент}	ИМГ	F _{дым}	F
ИМП	1.00	0.02	-0.09	0.04	-0.81
F _{вент}	0.02	1.00	0.73	0.93	0.19
ИМГ	-0.09	0.73	1,00	0,70	0.19
F _{дым}	0.04	0.93	0.70	1.00	0.16
F	-0.81	0.19	0.19	0.16	1.00

На основе данных табл. 2 прослеживается сильная связь управляющих параметров: частоты вентилятора воздуха и частоты дымососа. Для упрощения задачи оптимизации можно исключить один из двух названных параметров. Кроме того, рекомендуется [4] исключать из уравнения регрессии сильно связанные между собой переменные с коэффициентом корреляции больше 0.7. Так как существует сильная связь между положением заслонки на газ и частотами вентиляторов, то можно оста-

вить только два параметра. После упрощения задачи оставили переменные ИМП (x1) и ИМГ (x3), как переменные, не сильно коррелирующие друг с другом.

Для предлагаемой модели выполнена оценка коэффициента детерминации по формуле

$$R^2 = \frac{r_{yx_1}^2 + r_{yx_3}^2 - 2r_{yx_1}r_{yx_3}r_{x_1x_3}}{1 - r_{x_1x_3}^2},$$

где $r_{yx_1}, r_{yx_3}, r_{x_1x_3}$ – найденные оценки коэффициентов корреляции.

После подстановки в уравнение оценок коэффициентов корреляции, коэффициент детерминации принимает значение 0,66:

$$R^2 = \frac{(-0,806)^2 + 0,194^2 - 2*(-0,806)*0,194*(-0,089)}{1 - (-0,089)^2},$$

$$R^2 = 0,66,$$

$$R = \sqrt{0,66} = 0,82.$$

Из чего следует, что 34% приходится на необъяснённую долю дисперсии, которая относится к факторам, исключённым из рассмотрения.

Рассматривалось три модели поведения функции регрессии в форме полиномиальной зависимости первого, второго и третьего порядков.

В табл. 3 представлены оценки дисперсий трех построенных моделей (линейная, квадратичная и кубическая).

Таблица 3

Сравнение предлагаемых полиномиальных моделей поведения функции регрессии

	Линейная модель	Квадратичная модель	Кубическая модель
Сумма квадратов отклонений	3993.94	1346.97	405.43
Оценки дисперсии отдельного измерения	7.99	2.69	0.81

Так как регрессионные модели первого и второго порядка описывают функцию регрессии неудовлетворительно (сумма квадратов отклонений существенно больше, чем в третьем случае), то здесь приводятся оценки функции регрессии в пространстве двух управляющих переменных для кубической модели. Уравнение оценки кубической функции регрессии, полученное методом наименьших квадратов, имеет следующий вид:

$$F(x_1, x_3) = -38,468 - 0,256x_1 + 3,181x_3 - 1,456*10^{-4}x_1^2 + 7,128*10^{-3}x_1x_3 - 7,099*10^{-2}x_3^2 + 1,149*10^{-5}x_1^3 - 2,272*10^{-5}x_1^2x_3 - 4,723*10^{-5}x_1x_3^2 + 5,146*10^{-4}x_3^3.$$

Кроме того, оказалось, что эту кубическую модель можно дополнительно упростить. Примем значение коэффициента при x_1^2 равным 0. В данном случае это формулируется как основная гипотеза об адекватности упрощенной модели, которую проверили по критерию Фишера. Уравнение упрощенной кубической регрессии:

$$F(x_1, x_3) = -35,590552 - 0,273646x_1 + 3,026047x_3 + 7,591*10^{-3}x_1x_3 - 6,821*10^{-2}x_3^2 + 1,135*10^{-5}x_1^3 - 2,515*10^{-5}x_1^2x_3 - 4,969*10^{-5}x_1x_3^2 + 4,978*10^{-4}x_3^3.$$

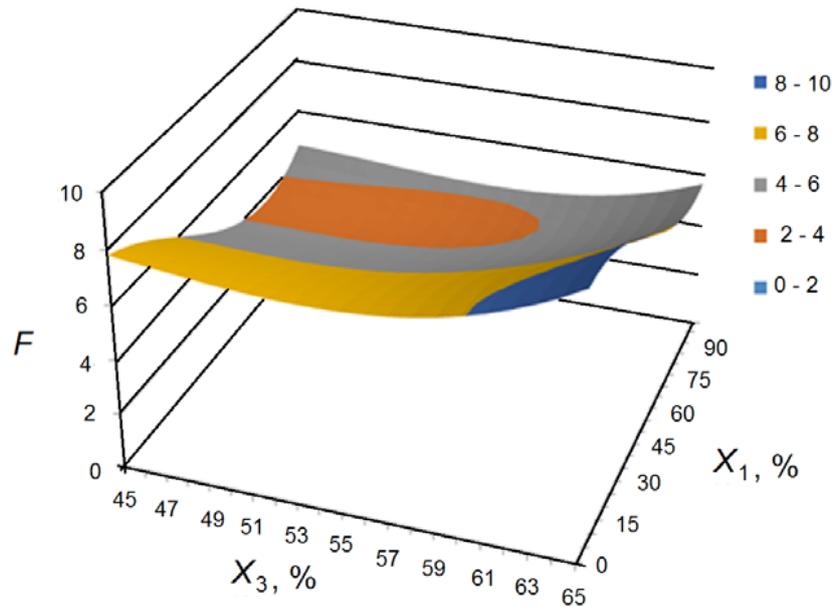


Рис. 4. Поверхность оценки функции регрессии

В табл. 4 приведены оценки дисперсий двух рассматриваемых моделей.

Таблица 4

Оценка предлагаемых кубических моделей оценки функции регрессии для критерия оптимальности

S_{min2} Сумма квадратов отклонений для полной кубической модели	S_{min1} Сумма квадратов отклонений для упрощенной кубической модели
405,432	405,460

Расчет критерия Фишера F осуществлялся по формуле

$$F = \frac{1}{k-m} \frac{(S_{min1} - S_{min2})}{\frac{1}{n-k} S_{min2}},$$

где k – число неизвестных параметров в уравнении регрессии полной кубической модели,

m – число неизвестных параметров в упрощенной модели,

n – объем выборки.

Вычислим это значение для $k = 10$, $m = 9$ и $n = 500$.

$F = 0.033$.

Критическое значение при уровне значимости $\alpha = 0.1$ составляет 2.71, так как

критерий F попал в область допустимых значений (существенно меньше критического значения), поэтому упрощенная модель нам подходит.

На рис. 4 представлена построенная поверхность оценки функции регрессии по упрощенной кубической модели.

Видно, что минимум находится в оранжевой области, на границе. Исходя из оценки функции регрессии, на рис. 5 представлен график зависимости минимального значения критерия от положения заслонки на питательную воду.

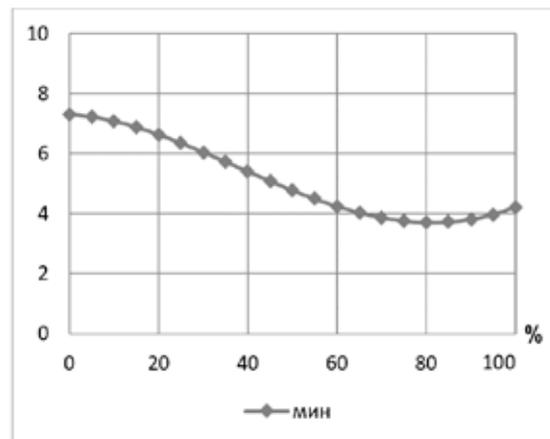


Рис. 5. График зависимости минимального значения критерия от паровой нагрузки (положения в % открытия заслонки на питательную воду – x_1)

Найдена зависимость (рис. 6) оптимального положения заслонки на газ в зависимости от паровой нагрузки (определяется положением заслонки на питательную воду x_1). Дискретизация на графике обусловлена отсчетом цифрового преобразователя, поэтому приведенная для наглядности зависимость аппроксимируется кривой.

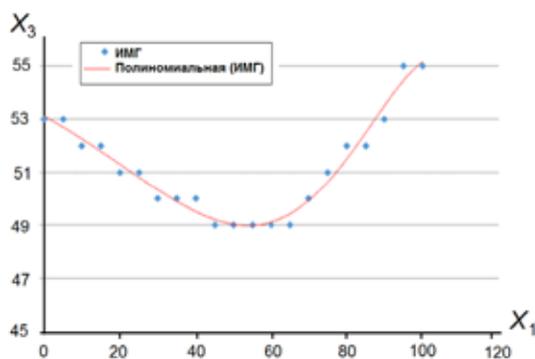


Рис. 6. График зависимости оптимального положения заслонки на газ от положения заслонки на питательную воду

Указанную зависимость можно использовать как в автоматическом, так и в ручном режиме управления процессом получения пара, для экономии топлива, что отвечает целевым установкам фирмы Уран-СПб [4].

Заключение

По предоставленным экспериментальным данным для системы управления «Факел 2010», впервые проведен анализ режимов работы парогенератора ДКВР-6.5-13 ГМ, решена задача поиска оптимальных режимов в зависимости от паровой нагруз-

ки. Показано, что целесообразно в качестве регрессионной модели использовать параметрическую модель третьего порядка (существенно увеличивается точность аппроксимации). Найденные зависимости будут использоваться при модернизации системы управления «Факел 2010» на промышленном парогенераторе. Описанную методику анализа данных мониторинга можно использовать и на более высокопроизводительных тепловых станциях топливо-энергетического комплекса, что приведет к большому экономическому эффекту, что приведет к экономии газового топлива на уровне 5–10%.

Список литературы

1. Парогенераторная установка. [Электронный ресурс]. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/vspomogatelnye-ustroystva-i-instrument/142436-parogeneratornaya-ustanovka-ru/> (дата обращения: 09.08.22).
2. Наумов Н.Р., Марьяндышев П.А., Попов А.Н., Любов В.К. Исследование работы газовых котлов малой мощности // Технические науки. 2017. № 4. С. 27–33.
3. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов вузов. М.: МЭИ, 2016. 352 с.
4. Новиков О.Н., Окацкий А.Н., Чумаков С.И., Ананченко И.В., Шишкевич М.В. Оптимизация сжигания газового топлива в парогенераторе // Факторы и эффективные механизмы устойчивого развития / Под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. С. 102–125.
5. Шкаровский А.Л., Новиков О.Н., Новикова А.В., Полупкин В.Н. Разработка нового семейства интеллектуальных систем управления качеством сжигания топлива // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 12. С. 556–561.
6. BelaG. Liptak Process control and optimization. Vol. 2. Boca Raton: Taylor&FrancisGroup, 2006, 2368 с.
7. Экспериментальные данные. Файл Выборка-исх. [Электронный ресурс]. URL: <https://mctrewards.ru/Выборка-исх.xlsx> (дата обращения: 09.08.22).