

Модернизация системы управления воздухоподогревательной установкой

А.В. Калабин, Д.В. Горлатов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Построены модели разомкнутой и замкнутой систем автоматического управления подачей воздуха в паровой котел. Смоделирована разомкнутая система и на ее основе разработана замкнутая система с ПИ-регулятором, настроенным на оптимум по модулю. Рассмотрено введение в систему управления частотного преобразователя для более экономичной и щадящей эксплуатации электропривода вентилятора. Разработанная система состоит из моделей регулятора, преобразователя частоты, асинхронного двигателя и дутьевого вентилятора. Представлены результаты моделирования, демонстрирующие работоспособность полученной системы с соблюдением требований по устойчивости и быстродействию. Модернизированная система с ПИ-регулятором и частотным преобразователем обладает рядом преимуществ перед существующей, а изложенная методика ее построения может применяться при внедрении на предприятиях, использующих воздухоподогревательные установки.

Ключевые слова: система автоматического регулирования давления, система автоматического управления, замкнутая система, разомкнутая система, ПИ-регулятор, модульный оптимум.

Введение

Построение систем автоматизации – неотъемлемая часть современного производства. Состояние и важность повышения уровня автоматизации оборудования энергетических объектов рассматривались в [1], где был сделан вывод о необходимости повсеместного внедрения автоматизированных систем. В частности, корректно рассчитанная система автоматического управления (САУ) подачей воздуха в топку котла позволит оптимизировать расходы предприятия на электроэнергию и оборудование, что делает данную разработку актуальной для различных электростанций. В [2] изучался энергосберегающий эффект от внедрения частотно-регулируемых асинхронных приводов (ЧРП), что важно и для данной работы, поскольку планируется введение в систему управления частотного преобразователя.

В данной работе строится замкнутая система управления на основе модели преобразователя частоты [3], модели асинхронного электродвигателя

со скалярным управлением [4], динамической модели дутьевого вентилятора ВД-18 [5].

САУ проектируется на основе данных из технологической карты котла БКЗ-160 [6] ТЭЦ-1 в г. Коряжма, предоставленной АО «Группа «ИЛИМ»».

Выбор регулятора. Расчет параметров регулятора

Неизменяемая часть системы автоматизации: преобразователь частоты, двигатель и вентилятор, – не линейна. Определенных рекомендаций для выбора структуры регулятора и расчёта его параметров не существует, поэтому следует провести идентификацию всей неизменяемой части системы стабилизации давления. Для этого необходимо на вход преобразователя подать частоту, близкую к номинальной. После выхода системы на установившееся значение увеличим сигнал задания на 10 % от номинального (5 Гц), и зарегистрируем реакцию системы. Также необходимо подать нагрузку в виде номинального момента сопротивления двигателя АВВ МЗВР 355 LKB, используемого в установке. Данные действия необходимы для демонстрации работоспособности разомкнутой системы.

Определим основные параметры установки, которые потребуются для последующих расчетов и моделирования, и сведем их в таблицу №1.

Таблица № 1

Основные параметры установки

| | |
|---|-------|
| начальное значение давления P_H , кПа | 94,6 |
| конечное значение давления P_K , кПа | 118,9 |
| предел измерения шкалы датчика давления P_{III} , кПа | 150 |
| начальное значение частоты f_H , Гц | 45 |
| конечное значение частоты f_K , Гц | 50 |

Значения P_H и P_K взяты из режимной карты котельной. P_{III} определен по датчику давления EFM 112.

На рис. 1 построена модель разомкнутой системы регулирования давления в MATLAB Simulink.

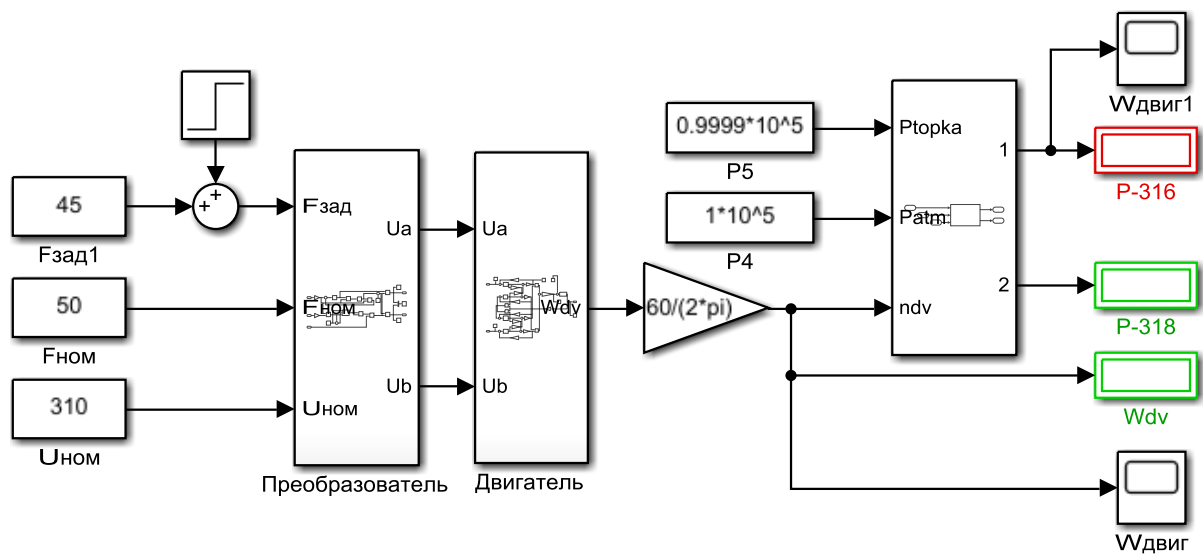


Рис. 1 – Модель разомкнутой системы стабилизации давления

По результатам моделирования получен график зависимости регулируемого давления, подаваемого в топку котла, – $P-316(t)$, изображенный на рис. 2. На нем видно реакцию разомкнутой системы стабилизации подачи давления дутьевого вентилятора ВД-18 на подачу момента (4025 Н·м) в трехфазном асинхронном двигателе на 15-й секунде и на ступенчатое изменение задания частотного преобразователя на 10 % от номинального (5 Гц) на 20-й секунде.

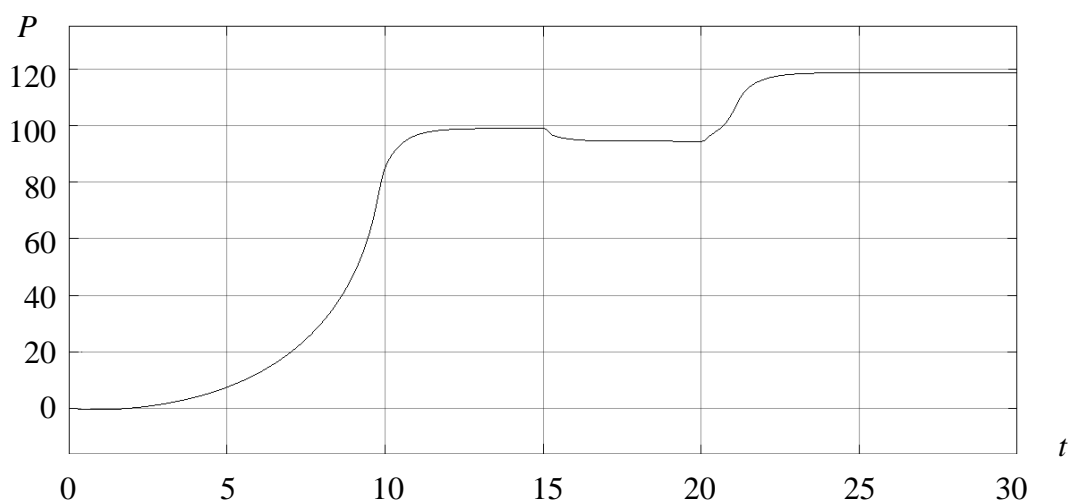


Рис. 2 – График зависимости $P-316(t)$

После изучения графика зависимости давления $P-316(t)$ на рис. 2, решено представить неизменяемую часть контура стабилизации давления в

соответствии с приближенным методом расчета в виде модифицированного апериодического звена второго порядка [7]:

$$W(p) = \frac{K_{\Pi} e^{-p\tau}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где K_{Π} – коэффициент передачи; T_1, T_2 – первая и вторая постоянная времени соответственно; τ – чистое запаздывание.

Рассчитаем вспомогательные параметры и параметры регулятора приближенным методом [7] и сведем их в таблицу №2.

Таблица № 2

Результаты расчета параметров регулятора

| | |
|---|---------|
| вспомогательное значение давления, кПа: $P_B = 0,63 \cdot (P_K - P_H) + P_H$ | 109,909 |
| начальное значение давления, %: $P_{H\%} = 100 \cdot P_H / P_{III}$ | 63,067 |
| конечное значение давления, %: $P_{K\%} = 100 \cdot P_K / P_{III}$ | 79,267 |
| вспомогательное значение времени t_B , при котором $P = P_B$, с | 1,3 |
| изменение частоты, Гц: $\delta f = f_K - f_H $ | 5 |
| коэффициент передачи объекта в безразмерном виде: $K_{\Pi} = (P_{K\%} - P_{H\%}) / \delta f$ | 3,24 |
| первая постоянная времени T_1 , с: $T_1 = 0,64 t_B$ | 0,832 |
| вторая постоянная времени T_2 , с: $T_2 = 0,5 T_1$ | 0,416 |

На рис. 3 показаны кривые разгона, построенные в Mathcad.

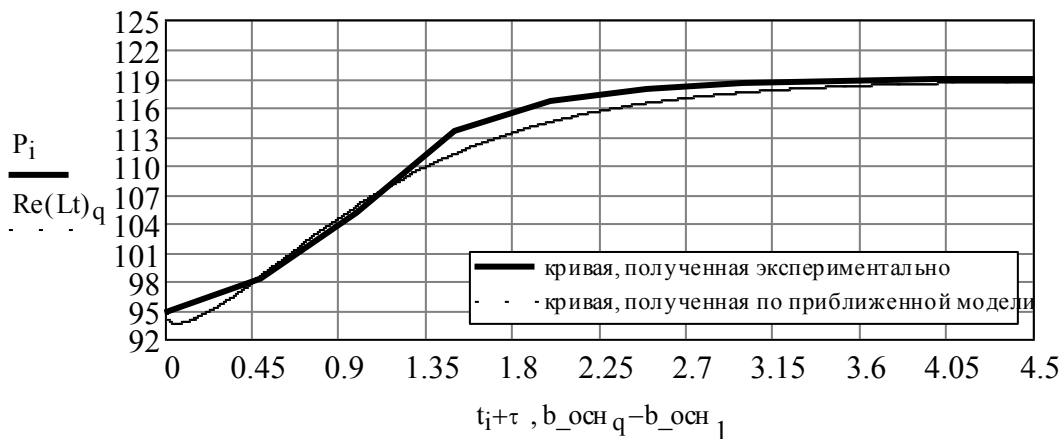


Рис. 3 – Графики кривых разгона

Расхождение кривой, полученной по приближенной модели, и экспериментальной кривой (провал в начальный момент времени у пунктирного графика) вызвано несовершенством метода построения – быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT).

Построение замкнутой системы управления

На рис. 4 показана существующая схема регулирования давления с использованием пропорционально-дифференциального регулятора (ПД-регулятора).

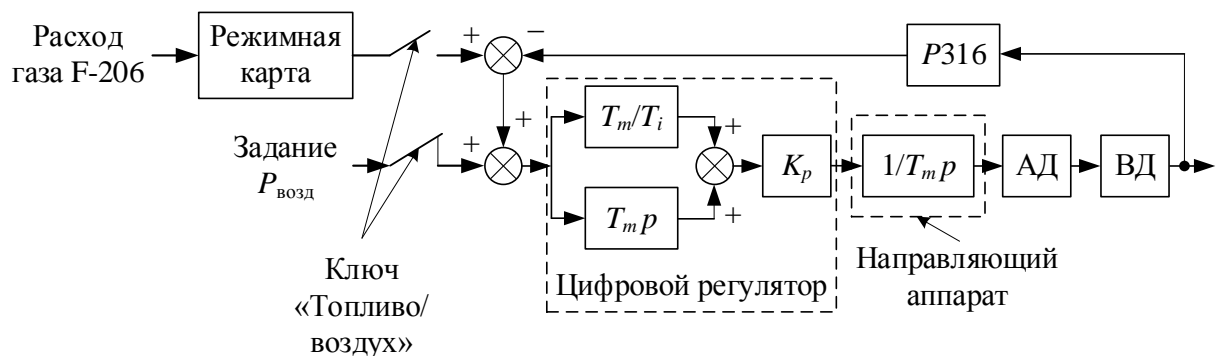


Рис. 4 – Существующая схема регулирования давления:

T_m, T_i – постоянные времени;

K_p – коэффициент передачи в установившемся режиме

В связи с отказом от использования направляющего аппарата, пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД-регулятор) должен быть заменен на пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор).

Схема регулирования давления примет вид, показанный на рис. 5. Система состоит из: регулятора; преобразователя частоты (ПЧ); асинхронного электродвигателя (АД); дутьевого вентилятора (ВД) и трубопровода.

С учетом найденных постоянных времени и коэффициента передачи, ПФ регулятора, упрощенная до апериодического звена второго порядка примет вид:

$$W = \frac{K_{\Pi}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{3,24}{(0,832 p + 1)(0,416 p + 1)}. \quad (1)$$

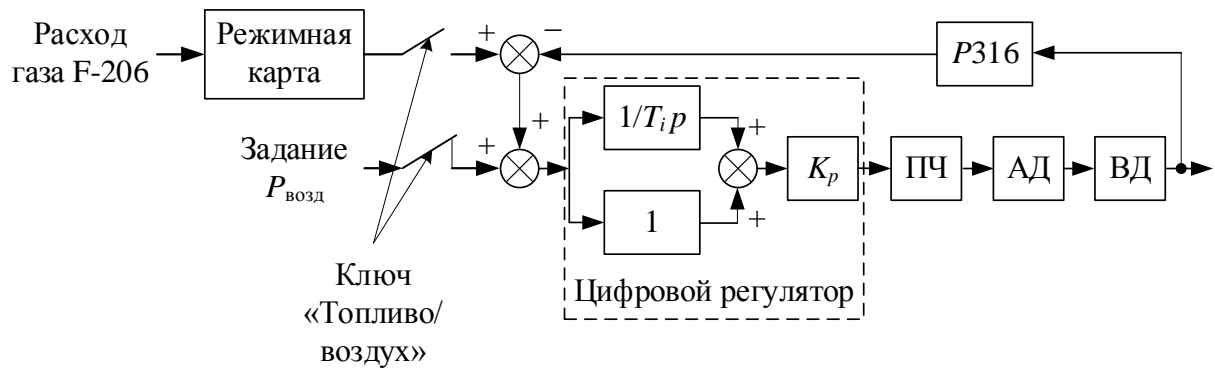


Рис. 5 – Модернизированная схема регулирования

На рис. 6 приведена структурная схема неизменяемой части реальной системы САУ давления, построенная по упрощенной схеме (1). Так как неизменяемая часть контура представлена одним апериодическим звеном второго порядка, то контур следует настраивать на оптимум по модулю (ОМ) с использованием ПИ-регулятора.

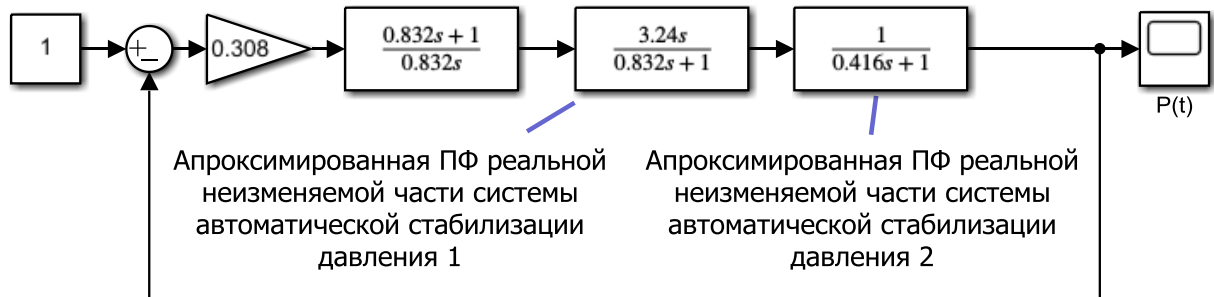


Рис. 6 – Структурная схема замкнутой системы стабилизации давления с аппроксимированной неизменяемой частью контура

K_p определяется по формуле

$$K_p = \frac{T_1}{2KT_2} = \frac{0,832}{2 \cdot 3,24 \cdot 0,416} = 0,308.$$

Постоянная времени регулятора T_p определяется как:

$$T_p = T_1 = 0,832 \text{ с.}$$

На рис. 7 представлена замкнутая система стабилизации давления с рассчитанным ПИ-регулятором.

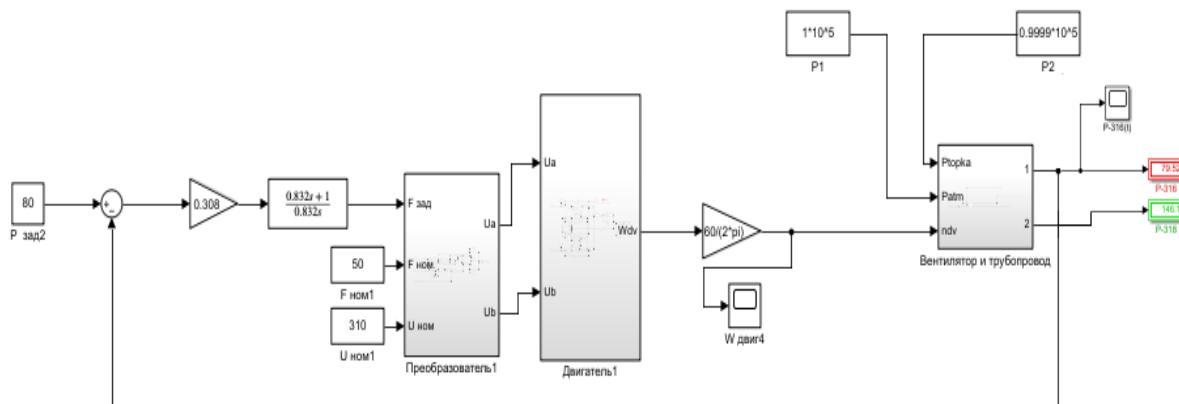


Рис. 7 – Замкнутая система стабилизации давления с рассчитанным ПИ-регулятором

Для проверки работоспособности системы подадим задающий сигнал на давление и зафиксируем реакцию системы. На рис. 8 представлен график зависимости регулируемого давления P-316(t).

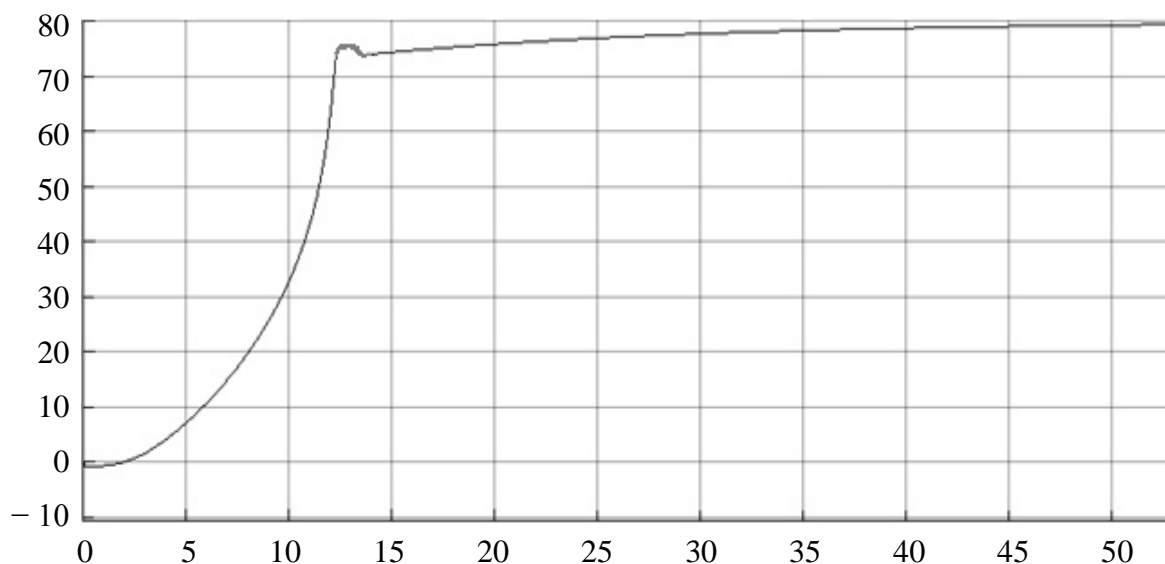


Рис. 8 – График зависимости регулируемого давления P-316(t)

Проанализировав рис. 8, видим, что давление стабилизировалось примерно за 55 секунд. Протяженность процесса объясняется сложностью модели объекта и приближенностью примененного метода. Для крупных котельных установок с большими габаритами и массой, подобное время

переходного процесса находится в пределах нормы. К тому же, по технологическим условиям работы они не требуют частых остановов и запусков.

Таким образом, мы убедились, что синтезированная система работоспособна.

Заключение

Разработанная САУ подачи воздуха в котёл состоит из: регулятора; преобразователя частоты; асинхронного электропривода; дутьевого вентилятора и трубопровода. САУ отвечает всем требованиям к подобным системам. Моделирование показало устойчивость ее работы и достаточный для больших котельных установок уровень быстродействия.

Методика, изложенная в статье, применима ко всем воздухонагнетательным аппаратам котельных установок, что подтверждает актуальность и важность данного исследования.

Поскольку скорость вращения двигателя, а следовательно, и подачи воздуха, регулируется с помощью преобразователя частоты, это позволяет двигателю не работать постоянно на полной мощности, в результате чего происходит экономия электроэнергии и продлевается ресурс его работы, что также является преимуществом разработанной САУ.

Литература

1. Сафаров И.М., Давлетхузина Э.М., Ишмухаметова Д.М., Баширова Л.И., Садыков Р.Д., Хлебников Д.А. Состояние уровня автоматизации энергетических объектов и решения, направленные на его повышение // Инженерный вестник Дона, 2021, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/7382.

2. Веселова Н.М., Иванов А.С., Иванова О.А., Кузнецова Т.А., Николаева С.И. Влияние частотных преобразователей насосных и вентиляционных



установок на работу сети внутреннего электроснабжения предприятия // Инженерный вестник Дона, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7535.

3. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / под. ред. А.Г. Народницкого. – СПб.: Санкт-Петербургская Электротехническая компания, 2004. – 127 с.

4. Алексеев В.В., Козярук А.Е., Загривный Э.А. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования: Учеб. пособие. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). – СПб, 2006. – 58 с.

5. Калабин А.В., Горлатов Д.В. Построение динамической модели вентилятора для системы автоматизации котла // Инженерный вестник Дона, 2023, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8411.

6. Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.

7. Лукас В.А. Теория управления техническими системами. Компактный учеб. курс для вузов – 3-е издание, перераб. и дополн. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2002. – 675 с.

References

1. Safarov I.M., Davlethuzina Je.M., Ishmuhametova D.M., Bashirova L.I., Sadykov R.D., Hlebnikov D.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/7382.

2. Veselova N.M., Ivanov A.S., Ivanova O.A., Kuznecova T.A., Nikolaeva S.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7535.

3. Kozjaruk A.E., Rudakov V.V. Sovremennoe i perspektivnoe algoritmicheskoe obespechenie chastotno-reguliruemyh jelektroprivodov [Modern



and perspective algorithmic support of frequency-controlled electric drives]. SPb.: Sankt-Peterburgskaja Jelektrotehnicheskaja kompanija, 2004. P. 127.

4. Alekseev V.V. Jelektricheskie mashiny. Modelirovanie jelektricheskikh mashin privodov gornogo oborudovanija [Electrical machines. Modeling of electrical machines drives of mining equipment]. Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj gornyj institut (tehnicheskij universitet). SPb, 2006. P. 58.

5. Kalabin A.V., Gorlatov D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8411.

6. Roddatis K.F., Poltareckij A.N. Spravochnik po kotel'nyh ustanovkam maloj proizvoditel'nosti [Handbook of low capacity boiler plants]. M.: Jenergoatomizdat, 1989. P. 488.

7. Lukas V.A. Teorija upravlenija tehničeskimi sistemami [Theory of control of technical systems]. Ekaterinburg: Izd-vo UGGGA, 2002. 675 p.