

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ ТЕПЛО- И ПАРОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Т.А. Барбасова

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В работе рассмотрены вопросы повышения эффективности оперативного управления распределенными технологическими сетями тепло- и пароснабжения производственных металлургических комплексов на основе динамического макро моделирования режимов сетей при структурных переключениях и резко переменных нагрузках. Предлагается осуществлять решение задач стабилизации потоков ресурсов в технологической сети на основе решения уравнений обратных задач динамики сети и использования расчетных контуров парирования потоковых возмущений. Алгоритмы парирования потоковых возмущений в технологической сети целесообразно строить с использованием обратных моделей динамики путей передачи входных управляющих потоков к входным узлам потоковых возмущений в сети. Предложена программная макро модель, позволяющая моделировать статические и динамические режимы систем паро- и теплоснабжения, управление зарядно-разрядными процессами паровых аккумуляторов. В данной модели регулируемым параметром является давление пара в аккумуляторе. Ограничение давления пара в аккумуляторе осуществляется с помощью специального регулятора давления, который настраивается на минимум потерь пара на свече при его избытке в сети. Данная программная макро модель позволяет моделировать работу потребителей с резко выраженной переменной нагрузкой.

Ключевые слова: макро моделирование, пароснабжение, пароаккумулятор, энергосбережение.

Введение

Современные АСУ технологическими сетями представляют собой автоматизированные комплексы. В основе таких комплексов находится высокопроизводительная вычислительная техника, позволяющая реализовывать сложные алгоритмы управления на основе информационных технологий и разнообразных численных методов.

Существенный вклад в развитие работ по расчету, моделированию и оптимизации тепловых сетей внесли Д.Е. Андрианов [1], А.Г. Евдокимов [2], Е.Я. Соколов [3], Н.М. Зингер [4], В.А. Стенников [5], А.П. Меренков, Э.Я. Рапопорт, Е.В. Сенинова, В.Г. Сидлер, В.Я. Хасилев и др. Основные идеи оперативного упреждающего управления содержатся в работах И. Ли, Л. Маркуса [6], А.И. Пропопя [7], Дж. Ришале, Я.З. Цыпкина и др.

Особенностью функционирования сетей тепло- и пароснабжения металлургических предприятий является то, что они относятся к классу крупномасштабных сложных нелинейных систем. Сети, как правило, включают в себя десятки источников, сотни потребителей, сотни километров теплотрасс. Кроме того, сети металлургических предприятий характеризуются выраженной динамикой потребления ресурсов, обусловленной переменными режимами работы технологического оборудования.

Модели указанных сетей могут быть построены с использованием различных подходов. Широкий класс моделей, ориентированных на анализ режимов сложных сетей тепло- и пароснабжения, в настоящее время строится на основе точных физических моделей, определяемых на основании базовых физических законов. Подобные модели используют большой объем исходной информации, получение которой требует больших затрат на проведение обследований сетей. Кроме того, физические модели ориентированы на анализ деталей процессов и непосредственно не отражают причинно-следственных связей параметров сетей, что затрудняет их использование для оперативного управления сетями в целом и повышает время принятия управляющих решений.

Вследствие сказанного перспективным подходом для оперативного управления сложными сетями является применение динамического моделирования, основанного на использовании сигнально-ориентированных моделей, отражающих причинно-следственные связи параметров сетей. Однако для таких сложных технических систем, которыми являются крупномасштабные сети тепло- и пароснабжения, построение точных динамических моделей встречает серьезные трудности, связанные с практически необозримой их сложностью. Выход ищется в многоуровневом подходе к

построению моделей на основе использования макромоделей. При этом возникают дополнительные трудности, обусловленные межуровневыми противоречиями, необходимостью использования обратных динамических операторов с потерей «физичности» представлений и др. Все это приводит к некорректным постановкам задач моделирования, неоднозначности решений и слабой сходимости итерационных процессов решения задач. Поэтому разработка адекватных динамических макромоделей сложных разветвленных паровых сетей и сетей теплоснабжения для оперативного управления режимами работы сетей представляет собой нетривиальную задачу. Данная задача решалась коллективом кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ (НИУ): д.т.н., проф. Л.С. Казариновым, д.т.н., проф. Д.А. Шнайдером, к.т.н., доц. О.В. Колесниковой [8–11].

Построение обратных моделей динамики сетей

Рассматриваемый подход к парированию возмущений в сетях основывается на построении обратных моделей динамики сетей. В этом случае достигается компенсация возмущений в сети, что обеспечивает стабилизацию потоков на входах потребителей.

Построение обратных моделей динамики путей передачи потоков в сети является некорректно поставленной задачей. В работе предложен метод регуляризации данной некорректно поставленной задачи. Метод основан на введении в модель сети расчетных контуров регулирования, которые позволяют в режиме реального времени определять величины парирующих потоков.

Решение следующего операторного уравнения позволит математически осуществить построение обратных моделей динамики:

$$D_z = L_c(u). \quad (1)$$

Однако указанная задача является некорректно поставленной. Поэтому необходимо выполнить ее регуляризацию. Регуляризация некорректно поставленной задачи может быть выполнена на основе использования регуляризирующего оператора α_R :

$$L_c(u) + \alpha_R u = D_z. \quad (2)$$

Тогда решение задачи будет проводиться по структурной схеме, приведенной на рис. 1. Здесь величина возмущающего потока z , полученная в результате измерения реального потока в сети D_z , поступает на специальную вычислительную схему, реализуемую в АСУ, которая содержит модель пути передачи входного парирующего сигнала h на выходной стабилизируемый поток ΔD_n . Величина парирующего сигнала h вычисляется в расчетном контуре типа регулирующей отрицательной обратной связи, в котором полагается, что коэффициент усиления регулятора Pez равен α_R^{-1} .

Структурно данный расчетный контур аналогичен контурам систем автоматического регулирования, которые формируют сигнал управления h из условия слежения приращению стабилизируемого потока ΔD_n за величиной возмущающего потока D_z . В этом случае подача парирующего сигнала $u = -h$ в реальную сеть через исполнительный механизм ($D_u = u$) приведет к компенсации возмущения D_u стабилизируемого потока ($\Delta D_n = -D_u$).

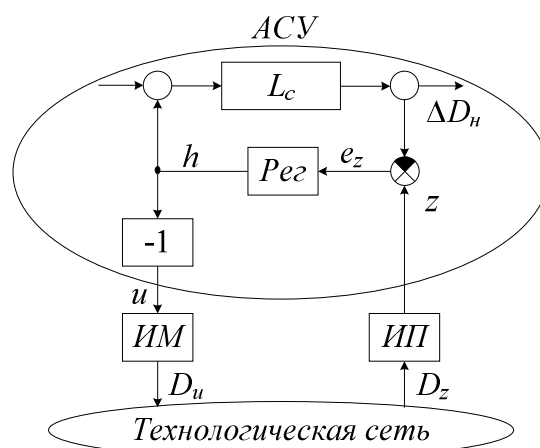


Рис. 1. Структурная схема парирования возмущений

Модель сети с расчетными контурами регулирования будем называть расчетной моделью сети. Построение расчетной модели сети может быть выполнено с использованием известных методов теории автоматического управления. Используя расчетную модель сети, можно в реальном времени определять сигналы управления, парирующие возмущения потоков в технологической сети.

Расчет парового аккумулятора

Одним из центральных элементов паровой сети является паровой аккумулятор. Расчет парового аккумулятора осуществляется совместно с присоединяемыми к нему элементами сети. Базовым уравнением, связывающим температуру, давление, и плотность пара, является уравнение Клапейрона – Менделеева. Масса пара, содержащегося в паровом аккумуляторе, определяется через известный объем аккумулятора и плотность пара. Отличительной особенностью моделирования парового аккумулятора является то, что данный элемент является динамическим: расходы пара на входе и выходе аккумулятора равны только в установившемся режиме, при этом численные значения расходов зависят как от состояния самого аккумулятора (давления, массы пара), так и от давлений и расходов в остальных узлах и участках паровой сети.

На рис. 2 приведена структурная схема макромоделей парового аккумулятора.

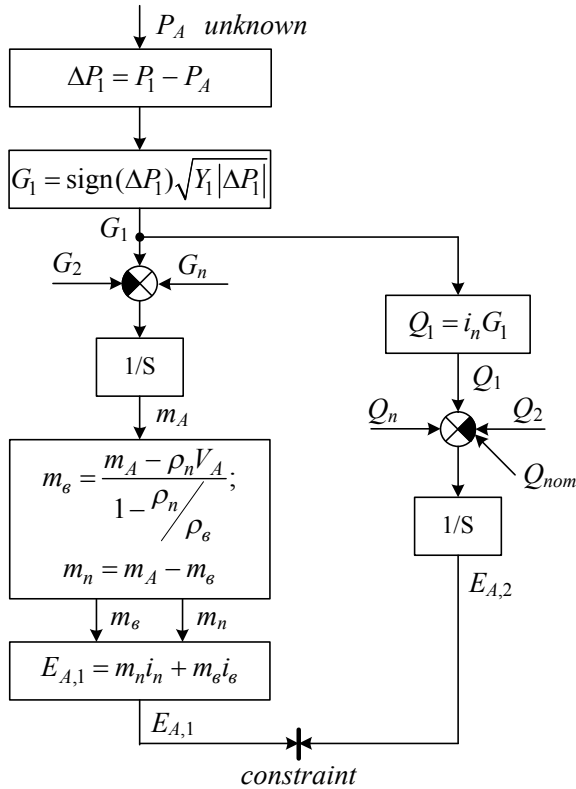


Рис. 2. Структурная схема макромоделли парового аккумулятора

Макро модель парового аккумулятора описывается уравнениями, соответствующими описанным выше физическим процессам и структурной схеме (см. рис. 2.):

$$m_A(t) = m_6(t) + m_n(t);$$

$$V_n(t) = V_A - \frac{m_6(t)}{\rho_6(T_A(t))};$$

$$T_A(t) = f_{нас}(P_A(t));$$

$$m_A(t) = \int_0^t (G_1(t) - G_2(t) + G_n(t)) dt;$$

$$E_{A,1}(t) = m_6(t) \cdot i_6(t) + m_n(t) \cdot i_n(t);$$

$$E_{A,2}(t) = \int_0^t (Q_1(t) - Q_2(t) - Q_{ном}(t) + Q_n(t)) dt;$$

$$Q_1(t) = G_1(t) \cdot i_{n1}(t);$$

$$Q_2(t) = G_2(t) \cdot i_{n2}(t);$$

$$Q_{ном}(t) = K_n \cdot F_A \cdot (T_A(t) - T_{нар}(t));$$

$$Q_n(t) = G_n(t) \cdot i_n(t),$$

где $Q_1(t)$, $Q_2(t)$, $Q_n(t)$, $Q_{ном}(t)$ – тепловая мощность входящего и выходящего пара; $\rho_6(T_A(t))$ – зависимость плотности воды [кг/м³] от ее температуры; $f_{нас}(P_A(t))$ – зависимость температуры пара в состоянии насыщения от его давления; $i_6(t)$, $i_n(t)$, $i_{n1}(t)$, $i_{n2}(t)$, – энтальпии воды в аккумуляторе, питательной воды, входящего и выходящего пара соответственно [кДж/кг], подпитки и потерь соответственно [кВт]; $E_A(t)$ – тепловая энергия, накопленная в паровом аккумуляторе [кДж]; V_A , F_A – объем [м³] и площадь [м²] поверхности парового аккумулятора; K_n – коэффициент передачи тепла от поверхности аккумулятора в окружающую среду [кДж/(кг·°C)]; $T_{нар}(t)$ – температура наружного воздуха [°C]; $m_A(t)$ – масса воды и пара в паровом аккумуляторе [кг].

Паровые аккумуляторы (ПА) в количестве 7 штук входят в состав энергокорпуса и определяют режим его работы. Энергокорпус является центральным элементом пароснабжения промплощадки ККЦ и КХП.

На рис. 3 приведена макро модель управления процессами заряда-разряда парового аккумулятора. Здесь приняты следующие обозначения: P_1 , P_2 – напор входящего и выходящего пара в аккумулятор соответственно; Y_1 , Y_2 – проводимость присоединяемой к паровому аккумулятору части схемы от источников и потребителей соответственно; P_{A0} – максимальное допустимое значение давления пара в паровом аккумуляторе; ΔP_A – разность P_{A0} и P_A ; $Рег$ – ПИ-регулятор; $G_{св}$ – расход пара, проходящего через свечу; $G_{ОКГ}$ – расход пара от котлов.

В рассматриваемой системе управления регулируемым параметром является давление пара в аккумуляторе. Заряд парового аккумулятора происходит от источников пара. Ограничение давления пара производится с помощью регулятора $Рег$.

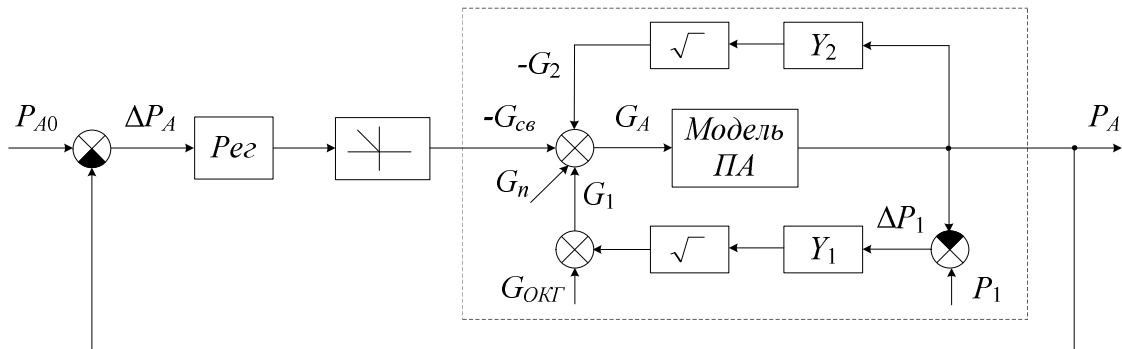


Рис. 3. Структурная схема макромоделли управления зарядно-разрядными процессами парового аккумулятора

С использованием рассмотренных выше методик разработана программная макромодел системы паро- и теплоснабжения промплощадки ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск, Россия). Разработка программной макромодел осуществлялась в среде моделирования и визуализации VisSim.

Для иллюстрации на рис. 4 приведен видеокادر макромодел системы паро- и теплоснабжения. На рис. 4 приняты следующие обозначения: синие линии – паропроводы низкого давления; красные линии – паропроводы высокого давления; зеленые линии – трубопроводы системы теплоснабжения; блоки серого цвета – источники; блоки белого цвета – потребители.

Макромодел визуализирует структурные схемы сетей паро- и теплоснабжения с разной степенью детализации. Структурная схема построена в ориентированных связях, отражающих направления потоков в сети. Направление движения теплоносителя в нормальном режиме работы указано стрелкой на трубопроводе.

Разработанная программная макромодел позволяет моделировать статические и динамические режимы систем паро- и теплоснабжения, зарядно-разрядные процессы паровых аккумуляторов, а также работу потребителей с резко выраженной переменной нагрузкой, к которым, например, относится установка вакуумирования стали.

Кроме того, разработаны модели источников паро- и теплоснабжения, потребляющих природный газ и (или) вырабатывающих электрическую энергию. К подобным источникам относятся электростанции и некоторые котельные. Моделирование источников паро- и теплоснабжения происходит на основе их рабочих характеристик с целью оценки потребления природного газа и выработки электрической энергии.

Результаты проведенной опытной эксплуатации программной макромодел показали, что макромодел обладает достаточной для практического использования точностью моделирования и может быть рекомендована для оперативного управления сетями паро- и теплоснабжения, а также для решения задач по выбору оптимальных вариантов функционирования систем паро- и теплоснабже-

ния по критерию максимума выработки электрической энергии на электрических станциях (минимума потребления природного газа).

Выводы

В работе при расчете парирующих потоков сети необходимо использовать ориентированные макромодел. С этой точки зрения существующие программы гидравлических расчетов сетей не ориентированы на данную задачу. Они, как правило, ориентированы на детализованный расчет режимов паровых сетей для целей их проектирования. Поэтому такие модели являются неориентированными и чрезмерно детализованными для задач оперативного управления. Чрезмерная детализация параметров сетей обуславливает высокую стоимость и трудоемкость их обследования и идентификации теплотехнических параметров. Принимая во внимание, что сети металлургических предприятий являются весьма протяженными (суммарная длина до 300 км) и питают большое количество потребителей (более 1000), построение точных гидравлических моделей подобных сетей представляет собой чрезвычайно сложную и трудоемкую задачу. Поэтому в данной работе предлагается методика построения ориентированной динамической макромодел сети, предназначенной для решения задач оперативного управления.

Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение оперативного управления на основе динамического макромоделирования может быть эффективно использовано для решения задач оперативно-диспетчерского управления технологическими сетями пароснабжения. Применение оперативного управления с использованием динамических макромодел позволяет стабилизировать режимные параметры пароснабжения потребителей сетей при структурных изменениях и резко переменных нагрузках.

Применение разработанной макромодел осуществляется для выбора вариантов оптимальных режимов тепло- и пароснабжения потребителей по критерию минимума потребления покупных ресурсов, например, минимума потребления природного газа на электрической станции предприятия.

Литература

1. Андрианов, Д.Е. Проектирование и расчет тепловой сети промышленного предприятия на основе математических моделей / Д.Е. Андрианов, Р.А. Штыков, Ю.В. Уткин // Промышленная энергетика. – 2004. – № 3. – С. 24–38.
2. Евдокимов, А.Г. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях / А.Г. Евдокимов. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.
3. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
4. Зингер, Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
5. Стенников, В.А. Методы комплексной оптимизации развития теплоснабжающих систем / В.А. Стенников, Е.В. Сеннова, Т.Б. Ощепкова // Известия РАН. Энергетика. – 2006. – № 3. – С. 44–54.

6. Lee, E.B. *Foundations of Optimal Control Theory* / E.B. Lee, L. Markus. – New York: Wiley, 1967. – 576 p.
7. Propoi, A.I. *Use of linear programming methods for synthesizing sampled-data automatic systems* / A.I. Propoi // *Automatic Remote Control*. – Vol. 24 (7). – P. 837–844.
8. Казаринов, Л.С. *Системные исследования и управление/когнитивный подход/*: науч.-метод. пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.
9. *Complex Hydraulic Network Dispatching Control Based on Signal-Oriented Macromodel* / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova, O.V. Kolesnikova, D.A. Shnayder // *1st Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON-2015), Saint Petersburg, Russia*. – 2015. – Vol. 48, iss. 11. – P. 92–96. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.165
10. Шнайдер, Д.А. *Распределенное управление пароснабжением промышленных потребителей на основе динамической программной модели* / Д.А. Шнайдер, П.Н. Дивнич, И.Е. Вахромеев // *Автоматизация и современные технологии*. – 2011. – № 5. – С. 31–37.
11. Shnaider, D.A. *Modeling the dynamic mode of steam accumulator* / D.A. Shnaider, P.N. Divnich, I.E. Vakhromeev // *Automation and Remote Control*. – 2010. – Vol. 71, no. 9. – P. 1994–1998. DOI: 10.1134/s0005117910090225

Барбасова Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доцент, Высшая школа электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; barbasovata@susu.ru.

Поступила в редакцию 3 декабря 2020 г.

DOI: 10.14529/power200401

OPERATIONAL CONTROL OF PROCESS HEAT AND STEAM SUPPLY NETWORKS IN METALLURGICAL PRODUCTION COMPLEXES

T.A. Barbasova, barbasovata@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper seeks to increase efficiency of operational control of distributed technological heat and steam supply networks in metallurgical production complexes based on dynamic macro-modeling of network modes under structural switching and sharply variable loads. It suggests solving problems of resource flows stabilization in a technological network by solving the equations of inverse problems of network dynamics and using calculated contours of stream disturbance rearrangement. It is advisable to construct flow disturbance parading algorithms in a process network using inverse models of path dynamics of input control streams to input nodes of flow disturbances in the network. The paper presents a software macro model that allows modeling static and dynamic modes of steam and heat supply systems, control of charging and discharge processes of steam accumulators. The controlled parameter of the model is the steam pressure in the battery. The steam pressure in the accumulator is limited by means of a special pressure regulator, which is adjusted to a minimum of steam losses on the plug at its excess in the network. This software macro model allows modeling the operation of consumers with a sharply expressed variable load.

Keywords: macromodeling, steam pumping, steam accumulator, energy saving.

References

1. Andrianov D.E., Shtykov R.A., Utkin Yu.V. [Engineering and Calculation of Heat Network of Industrial Enterprises on the Basis of Mathematical Models]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2004, no. 3, pp. 24–38. (in Russ.)
2. Evdokimov A.G., Tevyashev A.D., Dubrovskiy V.V. *Modelirovanie i optimizatsiya potokoraspredeleniya v inzhenernykh setyah* [Modeling and Optimization of Stream Distribution in Engineering Networks]. Moscow, Stroyizdat, 1990. 368 p.

3. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti: uchebnyk dlya vuzov* [District Heating and Heat Networks: Manual for High Schools]. Moscow, MEI Publ., 2001. 472 p.
4. Zinger N.M. *Gidravlicheskie i teplovye rezhimy teplofikatsionnykh sistem* [Hydraulic and Heating Modes of Heating Systems]. Moscow, Energiya, 1986. 320 p.
5. Stennikov V.A., Sennova E.V., Oshchepkova T.B. [Method of complex optimization of heat supply systems development]. *Izvestiya RAN. Energetika* [News of Russian Academy of Sciences. Energy], 2006, no. 3, pp. 44–54. (in Russ.)
6. Lee E.B., Markus L. *Foundations of Optimal Control Theory*. New York, Wiley Publ., 1967. 576 p.
7. Propoi A.I. Use of linear programming methods for synthesizing sampled-data automatic systems. *Automatic Remote Control*, vol. 24 (7), pp. 837–844.
8. Kazarinov L.S. *Sistemnye issledovaniya i upravlenie /kognitivnyy podhod/* [Systems Research and Management /Cognitive Approach/]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., Izdatel' T. Lur'e Publ., 2011. 524 p.
9. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Kolesnikova O.V., Shnayder D.A. [Complex Hydraulic Network Dispatching Control Based on Signal-Oriented Macromodel]. *1st Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON-2015)*, Saint Petersburg, RUSSIA, 2015, vol. 48, iss. 11, pp. 92–96. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.165
10. Shnayder D.A., Divnich P.N., Vakhromeyev I.E. [Steam supply distributed control of the industrial consumer from a dynamical programming model]. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and Contemporary Technologies], 2011, no. 5, pp. 31–37. (in Russ.)
11. Shnaider D.A., Divnich P.N., Vakhromeev I.E. Modeling the dynamic mode of steam accumulator. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 9, pp. 1994–1998. DOI: 10.1134/s0005117910090225

Received 3 December 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Барбасова, Т.А. Оперативное управление технологическими сетями тепло- и пароснабжения производственных металлургических комплексов / Т.А. Барбасова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 5–11. DOI: 10.14529/power200401

FOR CITATION

Barbasova T.A. Operational Control of Process Heat and Steam Supply Networks in Metallurgical Production Complexes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 5–11. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200401
