

## Математическая модель систем регулирования энергетических турбин с регулируемыми отборами пара

© Д.В. Мельников, Ч.Т. Мин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, 248000, Россия

*Разработана математическая модель системы регулирования конденсационной турбины ПТ-25/30-90/10М (ПТ-12/15-35/10М) Калужского турбинного завода. Турбина активного типа имеет два регулируемых (производственный и теплофикационный) и три нерегулируемых объема для регенеративного подогрева питательной воды. Эта турбина предназначена для привода синхронного электрического генератора типа ТВС-30 мощностью 30 МВт с частотой вращения 3000 об/мин и для снабжения тепловых потребителей паром из регулируемых отборов. Динамика системы регулирования турбины описывается нелинейной системой из двенадцати дифференциальных уравнений. Проанализированы модели турбины путем численного решения дифференциальных уравнений на ЭВМ и проведено сравнение полученных результатов с результатами экспериментов, подтвердившее высокую степень адекватности математических моделей.*

**Ключевые слова:** паровая турбина, система регулирования, математическая модель, регулируемый отбор.

**Введение.** При изучении динамических характеристик систем регулирования энергетических турбин особое значение имеют математические методы. Они не только составляют основу аналитических методов, но и становятся составной частью экспериментальных исследований. При этом неперемное условие успеха — построение математических моделей, корректно отражающих динамические свойства элементов [1, 2]. Математическая модель позволяет определить количественные показатели качества управления турбинами, что является ответственной задачей, поскольку без знания этих показателей нельзя ни эксплуатировать существующие системы регулирования (следовательно, и турбины, которыми они оснащены), ни разрабатывать новые системы. Желательно, чтобы уровень сложности модели не превышал требуемого для данного вида исследований.

Математическое моделирование в исследованиях систем управления турбинами основано на методах теории автоматического управления [3]. Это относится и к приемам составления моделей звеньев системы и способам аналитического исследования, которые выбирают в зависимости от цели исследования и особенностей математической модели. Как и в других областях техники, в регулировании турбин

наблюдается постоянная тенденция к использованию все более сложных методов аналитического исследования. Если в начале развития систем регулирования турбин ограничивались изучением устойчивости и быстродействия линейной модели, в дальнейшем все большее распространение получил анализ нелинейных моделей, стали применять стохастические подходы, оптимизационные методы [4–8]. Это связано главным образом с усложнением требований, предъявляемых к качеству функционирования систем управления турбинами [9]. Настоящая работа посвящена моделированию систем регулирования энергетических турбин Калужского турбинного завода.

**Математическая модель системы регулирования энергетической турбины.** В качестве примера приведем модель конденсационной турбины ПТ-25/30-90/10М (ПТ-12/15-35/10М) активного типа, которая имеет два регулируемых (производственный и теплофикационный) и три нерегулируемых объема для регенеративного подогрева питательной воды [10]. Турбина предназначена для привода синхронного электрического генератора типа ТВС-30 мощностью 30 МВт с частотой вращения 3000 об/мин, а также для снабжения тепловых потребителей паром из регулируемых отборов. Камерами регулируемых отборов пара турбина разделена на части высокого, среднего и низкого давления (ЧВД, ЧСД и ЧНД).

**Уравнение движения ротора.** Если пренебречь изменениями фазового угла генератора относительно энергосистемы по сравнению с частотой валопровода, изменениями энергии в индуктивностях цепей статора и потерями мощности в этих цепях, уравнение ротора можно представить в следующем виде:

$$\frac{T_{\varphi} d\varphi}{dt} = \theta\varphi - (1 - \theta)(\alpha_{\text{в}}\pi_1 + \alpha_{\text{с}}\pi_2 + \alpha_{\text{н}}\pi_3) - \lambda_1,$$

где  $T_{\varphi}$  — постоянная времени ротора (имеет размерность времени);  $\theta$  — некоторый эквивалентный коэффициент самовыравнивания;  $\varphi = \omega - \omega_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}}$  — относительное отклонение угловой частоты вращения ротора от номинального значения  $\omega_{\text{ном}}$ ;  $\alpha_{\text{в}}, \alpha_{\text{с}}, \alpha_{\text{н}}$  — доли участков ротора ЧВД, ЧСД, ЧНД в создании номинального момента турбины (определяются из теплового расчета);  $\pi_1, \pi_2, \pi_3$  — относительное давление пара в ЧВД, ЧСД, ЧНД соответственно;  $\lambda_1$  — относительное отклонение электрической нагрузки генератора.

**Камеры в проточной части.** Наличие сжимаемой среды в тракте приводит к тому, что изменения расхода по сечениям проточной части не следуют мгновенно за изменениями расхода через клапаны. Для анализа этого явления следует рассмотреть систему с распределенными параметрами, непрерывно изменяющимися вдоль парового

тракта, однако это существенно усложнит математическое моделирование. Обычно используют известную степень дискретизации, выделяя камеры, где условно сосредоточено определенное количество пара, и расположенные между этими камерами отсеки с турбинными ступенями, где создается соответствующее сопротивление потоку пара, причем количество пара в отсеках можно считать пренебрежимо малым по сравнению с количеством пара в камерах. Для рассматриваемой турбины можно выделить пять таких камер: камера между регулирующими клапанами ЧВД и первой ступенью турбины, камера производственного отбора пара, камера между регулирующими клапанами ЧСД и девятой ступенью турбины, камера теплофикационного отбора пара, камера между регулирующими клапанами ЧНД и шестнадцатой ступенью турбины. Примем процесс изменения параметров пара в камерах политропическим, уравнения объемов этих камер запишем в следующем виде:

$$\frac{T_{\pi_1}}{dt} d\pi_1 = \pi_0 \mu_{\text{в}} - \pi_1,$$

$$\frac{T_{\pi_2}}{dt} d\pi_2 = \pi_1 - (1 - \beta_{\text{отб}_1}) \pi_2 \mu_{\text{с}} - \beta_{\text{отб}_1} \pi_2 \mu_{\text{отб}_1} - \lambda_2,$$

$$\frac{T_{\pi_3}}{dt} d\pi_3 = (1 - \beta_{\text{отб}_1}) \pi_2 \mu_{\text{с}} - \pi_3,$$

$$\frac{T_{\pi_4}}{dt} d\pi_4 = \pi_3 - (1 - \beta_{\text{отб}_2}) \pi_4 \mu_{\text{н}} - \beta_{\text{отб}_2} \pi_4 \mu_{\text{отб}_2} - \lambda_3,$$

$$\frac{T_{\pi_5}}{dt} d\pi_5 = (1 - \beta_{\text{отб}_2}) \pi_4 \mu_{\text{н}} - \pi_5,$$

где  $T_{\pi_1}, T_{\pi_2}, T_{\pi_3}, T_{\pi_4}, T_{\pi_5}$  — постоянные времени соответствующих камер (время полного заполнения камеры при определенном расходе пара);  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$  — относительное давление пара в соответствующих объемах;  $\pi_0$  — относительное давления свежего пара;  $\beta_{\text{отб}_1}, \beta_{\text{отб}_2}$  — величины, характеризующие отбор пара на производственные и теплофикационные нужды;  $\mu_{\text{в}}, \mu_{\text{с}}, \mu_{\text{н}}$  — относительные перемещения клапанов турбины ЧВД, ЧСД, ЧНД соответственно;  $\mu_{\text{отб}_1}, \mu_{\text{отб}_2}$  — величины, соответствующие изменению эквивалентных сечений клапанов на линии подвода пара к тепловому потребителю;  $\lambda_2, \lambda_3$  — относительные изменения расхода пара в производственном и теплофикационном отборах.

**Система регулирования турбины.** Система регулирования паровых турбин Калужского турбинного завода представляет собой од-

нонасосную гидравлическую систему с двумя ступенями усиления (первая ступень проточная, вторая — отсечная). Рассматриваемая турбина с двумя регулируемыми отборами — промышленным и теплофикационным — имеет три системы парораспределения, управляющие впуском пара в ЧВД, ЧСД и ЧНД. Система регулирования такой турбины поддерживает в заданных пределах три регулируемых параметра: частоту вращения ротора и давление пара в промышленном и теплофикационном отборах. Поэтому для системы регулирования предусмотрены три сервомотора, управляемые тремя проточными линиями, два регулятора (измерителя) давления пара в промышленном и теплофикационном отборах турбины и трансформатор давления, измеряющий разность давления в линиях нагнетания и всасывания насоса-регулятора пропорционально квадрату частоты вращения ротора турбины.

Система регулирования с двумя регулируемыми отборами пара выполнена связанной и автономной, т. е. каждый из трех измерителей регулируемых параметров турбины воздействует на все три системы парораспределения, причем отклонение одного из регулируемых параметров не приводит к возмущениям двух других. При этом регулирующие окна во втулке трансформатора давления расположены так, что при перемещении его золотника изменение давления во всех трех импульсных линиях заставляет перемещаться в одинаковом направлении сервомоторы парораспределения ЧВД, ЧСД, ЧНД. Окна во втулке регулятора давления промышленного отбора расположены так, что при перемещении его золотника сервомотор парораспределения ЧВД движется в одном направлении, а сервомоторы ЧСД и ЧНД — в противоположном. При перемещении золотника регулятора давления теплофикационного отбора сервомоторы ЧВД и ЧСД движутся в одном направлении, а сервомотор парораспределения ЧНД — в противоположном. Каждая из обратных связей сервомоторов воздействует только на свою импульсную линию. Предполагая, что свойства датчика частоты вращения приближаются к свойствам идеального звена, а для промежуточных гидравлических усилителей рабочая жидкость является несжимаемой, уравнения системы регулирования запишем следующим образом:

$$T_{\mu_b} \frac{d\mu_b}{dt} = \begin{cases} 0,5 \frac{z_b^2}{\Delta z_{0_b}} \text{sign } z_b & \text{при } |z_b| \leq \Delta z_{0_b}, \\ z_b - 0,5 \Delta z_{0_b} \text{sign } z_b & \text{при } |z_b| > \Delta z_{0_b}; \end{cases}$$

$$T_{\mu_c} \frac{d\mu_c}{dt} = \begin{cases} 0,5 \frac{z_c^2}{\Delta z_{0_c}} \text{sign } z_c & \text{при } |z_c| \leq \Delta z_{0_c}, \\ z_c - 0,5 \Delta z_{0_c} \text{sign } z_c & \text{при } |z_c| > \Delta z_{0_c}; \end{cases}$$

$$T_{\mu_n} \frac{d\mu_n}{dt} = \begin{cases} 0,5 \frac{z_n^2}{\Delta z_{0_n}} \text{sign } z_n & \text{при } |z_n| \leq \Delta z_{0_n}, \\ z_n - 0,5 \Delta z_{0_n} \text{sign } z_n & \text{при } |z_n| > \Delta z_{0_n}; \end{cases}$$

$$T_{z_b} \frac{dz_b}{dt} = -z_b - k_{1\varphi} \frac{\varphi}{\delta_1} - k_{1\pi_2} \frac{\pi_2}{\delta_2} - k_{1\pi_4} \frac{\pi_4}{\delta_3} - \mu_b,$$

$$T_{z_c} \frac{dz_c}{dt} = -z_c - k_{2\varphi} \frac{\varphi}{\delta_1} + k_{2\pi_2} \frac{\pi_2}{\delta_2} - k_{2\pi_4} \frac{\pi_4}{\delta_3} - \mu_c,$$

$$T_{z_n} \frac{dz_n}{dt} = -z_n - k_{3\varphi} \frac{\varphi}{\delta_1} + k_{3\pi_2} \frac{\pi_2}{\delta_2} + k_{3\pi_4} \frac{\pi_4}{\delta_3} - \mu_n,$$

где  $T_{\mu_b}, T_{\mu_c}, T_{\mu_n}$  — постоянные времени сервомоторов ЧВД, ЧСД и ЧНД соответственно;  $T_{z_b}, T_{z_c}, T_{z_n}$  — постоянные времени отсечных золотников сервомоторов ЧВД, ЧСД и ЧНД;  $z_b, z_c, z_n$  — величины, соответствующие относительному изменению положения поршней отсечных золотников сервомоторов ЧВД, ЧСД, ЧНД;  $\Delta z_{0_b}, \Delta z_{0_c}, \Delta z_{0_n}$  — относительные высоты треугольного профиля кромок отсечных золотников сервомоторов ЧВД, ЧСД, ЧНД;  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  — степени неравномерности по частоте вращения, давлению в промышленном и теплофикационном отборе соответственно;  $k_{1\varphi}, k_{1\pi_2}, k_{1\pi_4}, k_{2\varphi}, k_{2\pi_2}, k_{2\pi_4}, k_{3\varphi}, k_{3\pi_2}, k_{3\pi_4}$  — передаточные числа, которые выбирают из условия независимости регулирования.

В рамках детерминированного анализа параметры модели для турбины ПТ-25/30-90/10М принимают следующие значения:

$$T_\varphi = 12 \text{ с}, \theta = 0,05, \alpha_b = 0,63, \alpha_c = 0,3, \alpha_n = 0,07,$$

$$T_{\pi_1} = 0,2 \text{ с}, T_{\pi_2} = 1 \text{ с}, T_{\pi_3} = 0,1 \text{ с}, T_{\pi_4} = 0,5 \text{ с}, T_{\pi_5} = 0,1 \text{ с},$$

$$\beta_{отб_1} = 0,46, \beta_{отб_2} = 0,68,$$

$$T_{\mu_b} = T_{\mu_c} = T_{\mu_n} = 0,2 \text{ с}, T_{z_b} = T_{z_c} = T_{z_n} = 0,05,$$

$$\Delta z_{0_b} = \Delta z_{0_c} = \Delta z_{0_n} = 0,3, \delta_1 = 0,04, \delta_2 = 0,1, \delta_3 = 0,2,$$

$$k_{1\varphi} = 0,681, k_{1\pi_2} = 0,255, k_{1\pi_4} = 0,064,$$

$$k_{2\varphi} = 1,229, k_{2\pi_2} = 0,345, k_{2\pi_4} = 0,116,$$

$$k_{3\varphi} = 2,890, k_{3\pi_2} = 0,812, k_{3\pi_4} = 1,078.$$

На рис. 1, 2 представлены результаты моделирования при полном сбросе электрической нагрузки, что соответствует  $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = \lambda_3 = 0$ .

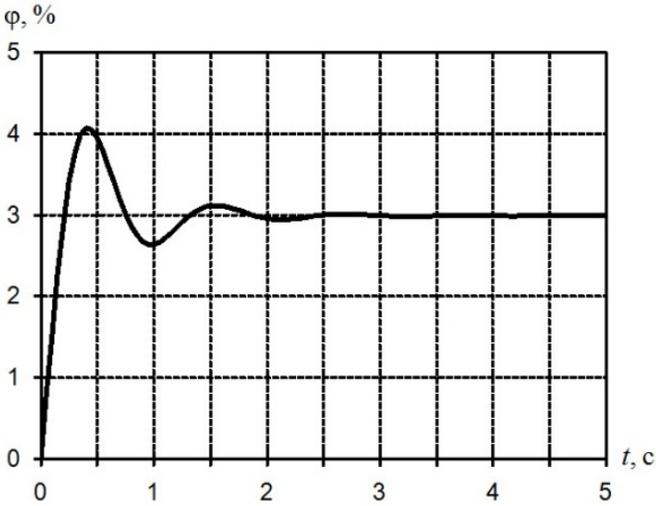


Рис. 1. Изменение частоты вращения  $\varphi$  турбины ПТ-25/30-90/10М с течением времени  $t$

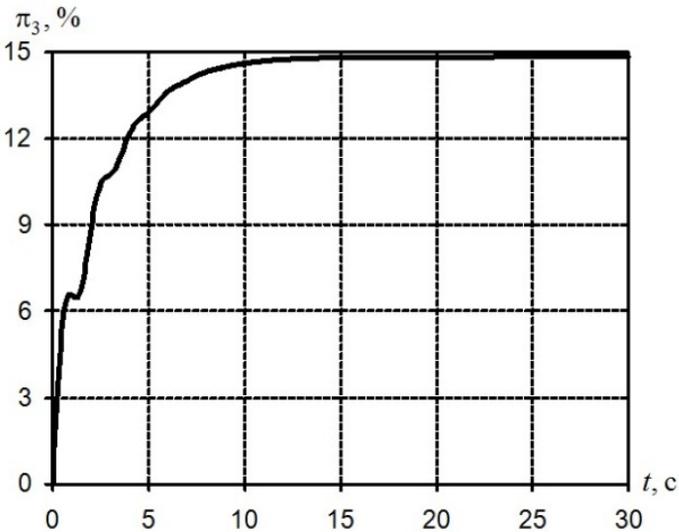


Рис. 2. Изменение давления  $\pi$  в производственном отборе турбины ПТ-25/30-90/10М с течением времени  $t$

**Заключение.** Динамика системы регулирования турбины ПТ-25/30-90/10М (ПТ-12/15-35/10М) описывается нелинейной системой из двенадцати дифференциальных уравнений. Из полученной системы путем определенного задания соответствующих коэффициентов и исключением некоторых уравнений можно получить модели турбины, работающей на конденсационном режиме или в режиме регулирования только одного из двух отборов пара. Проведенный анализ

полученных моделей путем численного решения дифференциальных уравнений на ЭВМ и сравнение его результатов с результатами экспериментов подтвердили адекватность математических моделей (ошибка количественного совпадения составила около 1,4 %).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (гранты №№ 14-48-03013, 14-41-03071).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Калашников А.А. *Динамика регулирования турбин*. Москва, Энергоатомиздат, 1999, 328 с.
- [2] Мельников Д.В., Фишер М.Р. Математическая модель контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130/3000. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. Энергетическое и транспортное машиностроение, с. 197–215.
- [3] Колесников А.А., ред. *Синергетические методы управления сложными системами: Энергетические системы*. Москва, Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013, 248 с.
- [4] Мин Чжо Ту. Особенности динамики регулирования энергетических турбин при случайных возмущениях. *Научное обозрение*, 2014, № 5, с. 175–180.
- [5] Мельников Д.В., Егупов Н.Д. Синтез систем регулирования энергетических турбин в условиях параметрической неопределенности. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2011, № 5–1, с. 108–113.
- [6] Мельников Д.В., Фишер М.Р. Динамика регулирования энергетических турбин с учетом случайных возмущений. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. Энергетическое и транспортное машиностроение, с. 143–150.
- [7] Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин П.Ю. Исследование и расчет параметров элементов системы регулирования частоты вращения ротора турбины с учетом параметрической неопределенности математической модели. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2014, № 1, с. 78–93.
- [8] Мельников Д.В. *Метод автоматизированного исследования систем регулирования энергетических турбин при случайных возмущениях*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Обнинск, 2002, 23 с.
- [9] Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности. *Стандарт организации*. Москва, 2013. URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto\\_002-2013\\_freq\\_regulation.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_002-2013_freq_regulation.pdf).
- [10] Кирюхин В.И., Тараненко Н.М., Огурцова Е.П., Крюков В.И., Кургузников В.И., Лавров Е.И., Варакушев В.А. *Паровые турбины малой мощности КТЗ*. Москва, Энергоатомиздат, 1987, 216 с.

Статья поступила в редакцию 04.12.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Мельников Д.В., Мин Ч.Т. Математическая модель систем регулирования энергетических турбин с регулируемыми отборами пара. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/tctp/1366.html>

**Мельников Дмитрий Владимирович** родился в 1975 г., окончил Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1998 г. Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 125 печатных работ в области энергетики, электротехники, моделирования и управления техническими системами. Область научных интересов: энергетические системы управления. e-mail: melnikov-dv@yandex.ru.

**Мин Чжо Ту** — аспирант кафедры «Системы автоматического управления» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 9 печатных работ в области энергетики, электротехники, моделирования и управления техническими системами. Область научных интересов: энергетические системы управления. e-mail: minkyawthu07@gmail.com

# Mathematical model of control systems of power turbines with controlled steam extraction

© D.V. Melnikov, Min Kyaw Thu

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000, Russia

The article presents a developed mathematical model of the control system of the condensing turbine PT-25/30-90/10M (PT-12/15-35/10M) for Kaluga Turbine Plant. This turbine of active type has two adjustable (productive and heat extraction) and three non-regulated volumes for regenerative heating feed water. The turbine is designed to drive a synchronous electric generator of the TVS-30 type with the capacity of 30 MW and the rate speed of  $3000 \text{ min}^{-1}$ , as well as to supply heat consumers with steam from controlled extraction. The dynamics of the turbine control system is described by a nonlinear system of twelve differential equations. The analysis of the obtained models by computer numerically solved differential equations and comparing the results with the experimental ones confirmed the high degree of adequacy of the mathematical model.

**Keywords:** steam turbine, control system, mathematical model, controlled steam extraction.

## REFERENCES

- [1] Kalashnikov A.A. *Dinamika regulirovaniya turbin* [The Dynamics of Turbine Control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1999, 328 p.
- [2] Melnikov D.V., Fisher M.R. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seria Mashinostroenie – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2011, special issue Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie [Power and Transport Mechanical Engineering], pp. 197–215.
- [3] Kolesnikov A.A., ed. *Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi Sistemami. Energeticheskie sistemy* [Synergistic Methods of Managing Complex systems: Energy systems]. Moscow, Book House «LIBROCOM», 2013, 248 p.
- [4] Min Kyaw Thu. *Nauchnoe obozrenie – Scientific Review*, 2014, no. 5, pp. 175–180.
- [5] Melnikov D.V., Egupov N.D. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Proceedings of the Tula State University. Engineering Sciences*, 2011, no. 5, part 1, pp. 108–113.
- [6] Melnikov D.V., Fisher M.R. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seria Mashinostroenie – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2011, special issue «Energeticheskoe i transportnoe mashinostroenie» [Power and Transport Mechanical Engineering], pp. 143–150.
- [7] Korniyushin Yu.P., Melnikov D.V., Egupov N.D., Korniyushin P.Yu. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seria Estestvennyye nauki – Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*. 2014, no. 1, pp. 78–93.
- [8] Melnikov D.V. *Metod avtomatizirovannogo issledovaniya sistem regulirovaniya energeticheskikh turbin pri sluchaynykh vozmuscheniyakh* [Method for Automated Research of Power Turbine Control Systems at Random Perturbations]. Author's Abstract of Candidate of Engineering Sciences Thesis. Obninsk, 2002, 23 p.
- [9] Normy uchastiya energoblokov teplovykh elektrostantsiy v normirovannom pervichnom regulirovanii chastoty i avtomaticheskome vtorichnom regulirovanii

chastoty i peretokov aktivnoi moschnosti [The Rules of Participation Units of Thermal Power Plants in the Initial Normalized Frequency Control and Automatic Secondary Regulation of Frequency and Active Power Flows]. *Standard of the Organization*. Official Publication. Moscow, 2013. Available at: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto\\_002-013\\_freq\\_regulation.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_002-013_freq_regulation.pdf).

- [10] Kiryukhin V.I., Taranenko N.M., Ogurtsova E.P., Kryukov V.I., Kurguznikov V.I., Lavrov E.I., Varakushev V.A. *Parovye turbiny maloy moschnosti* [Steam Low-Power KTP Turbine]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 216 p.

**Melnikov D.V.** (b. 1975), Candidate of Engineering Sciences, associate professor, head of the Electrical Engineering Department at Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch. The author of more than 125 published works in the field of power engineering, electrical engineering, modeling and control of engineering systems. Research interests: power control systems. e-mail: melnikov-dv@yandex.ru.

**Min Kyaw Thu**, post-graduate at the Automated Control Systems Department at Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch. The author of 9 published works in the field of energy, electrical engineering, modeling and control of engineering systems. Research interests: power control system. e-mail: minkyawthu07@gmail.com