

## О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И РЕЖИМА РАБОТЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ТУРБОПРИВОДОВ СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2018 Д.С. Калабухов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### ABOUT THE INFLUENCE OF WORKFLOW AND OPERATIONAL MODE PARAMETERS ON THE ENERGY EFFICIENCY OF A SYSTEM OF SERIES-CONNECTED ULTRALOW POWER DRIVES

Kalabukhov D.S. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*Utilization of the excess pressure energy of natural gas in the system of series-connected turbo expanders is promising from the point of view of energy saving in the gas transportation system. Theoretical work on the optimization of the regime and geometric parameters of such systems in the early stages of design is absent. In this paper, parametric studies were carried out on the effect of the project's initial data on the energy efficiency of a system of two turbo-generators with a power of up to 50 kW. Rational ranges of thermodynamic and regime ratios were found, which allows to significantly increase the design efficiency of the system of axial small-sized turbogenerators in comparison with the case of its design without taking into account the obtained information*

Энергетические установки малой мощности на базе малоразмерных турбинных приводов широко применяются в различных отраслях промышленности и в большинстве видов транспорта. Они нашли свою нишу в трубопроводном транспорте, особенно в газовой промышленности, для охлаждения природного газа и выработки электроэнергии для обеспечения собственных нужд линейных магистральных газопроводов, газоперекачивающих станций, газораспределительных станций, газораспределительных пунктов и щитов [1].

В настоящее время реализовано множество турбогенераторных установок различных схем в газотранспортной системе РФ (ГТС), многие из которых защищены патентами. В большинстве из них используется лишь одна турбина для привода соответствующего потребителя нагрузки.

В то же время, ввиду изначально высоких значений давлений газа и перепадов давления во многих случаях целесообразно применение системы последовательно расположенных друг за другом турбоприводов (рис. 1). Каждая турбина является приводом отдельного генератора.

Поскольку различные участки ГТС имеют свои диапазоны параметров газа и неодинаковую потребность в мощностях генераторов электроэнергии, возникает вопрос о

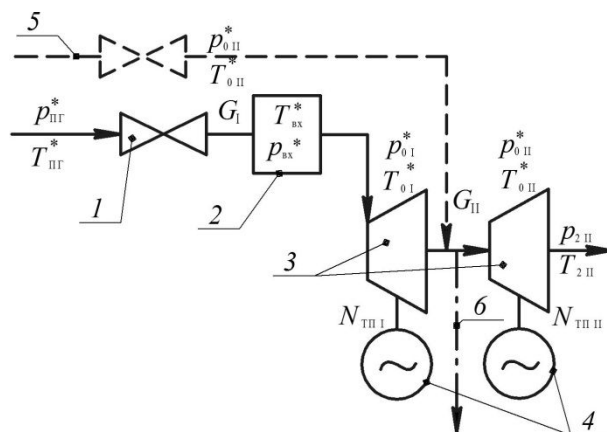


Рис. 1. Схема системы последовательно расположенных турбогенераторов природного газа  
1 – блок редуцирования; 2 – подогреватель;  
3 – турбопривод; 4 – управляемый генератор; 5, 6 – линии подвода и отвода газа

степени и характере влияния термодинамических и режимных параметров на эффективность системы турбоприводов (СТП) как в целом, так и на отдельные турбины.

Для исследования влияния термодинамических и режимных параметров на эффективность СТП использовались принципы, алгоритмы и математические модели методологии начального проектирования одноступенчатых турбоприводов сверхмалой мощности [2].

Для решения поставленной задачи была разработана подпрограмма оптимизации системы двух газодинамически связанных

турбин путём дополнения существующей математическими моделями течения во второй турбине и наложения дополнительных ограничений:

- условия баланса расходов газа через турбины  $G_I - G_{II} = 0$ ;
- частота вращения ротора турбоагрегата  $5000 \leq n_i \leq 60000 \text{ мин}^{-1}$ ;
- температура газа на выходе из системы турбоагрегатов  $278 \leq T_{2II} \leq 313 \text{ К}$ .

Нижнее ограничение по температуре наложено по недопущению гидратообразования, а верхнее – из соображений обеспечения надежной работы теплоизоляционного и антикоррозийного покрытия газопровода [3]

Для изучения влияния заданных параметров рабочего тела на КПД системы двух турбогенераторов с расчётными мощностями  $N_I = 20 \text{ кВт}$  и  $N_{II} = 12 \text{ кВт}$  первоначально было выбрано три варьируемых параметра давление на входе  $p_{вх}^* = 0,1 \dots 2 \text{ МПа}$ , степень понижения давления в СТП  $\pi_{СТП} = 4 \dots 10$  и температура на входе  $T_{вх}^* = 323 \dots 423 \text{ К}$ . Однако в большинстве опытов было обнаружено, что температура газа на выходе из второго турбогенератора ниже минимально допустимой  $T_{2IImin}$ . Соблюсти ограничение по температуре оказалось возможным путём включения  $T_{вх}^*$  в состав оптимизируемых параметров турбины наряду с геометрическими, в диапазоне  $350 \dots 450 \text{ К}$ .

В результате исследований были получены локально-оптимальные значения  $p_{вх}^*_{opt} = 0,5 \text{ МПа}$  и  $\pi_{СТП} = 9,2$ . Такие значения  $p_{вх}^*_{opt}$  на участках ГТС характерны для газораспределительных пунктов.

Анализ зависимостей КПД СТП от  $p_{вх}^*$  и  $\pi_{СТП}$  показал, что с ростом  $p_{вх}^*$  КПД снижается, а с ростом  $\pi_{СТП}$  – несколько увеличивается.

Под исследованием влияния режимных параметров понималась оценка воздействия распределения мощностей  $\bar{N} = N_I / N_{II}$  при определённых  $N_I$ , а также соотношений  $\bar{n} = n_1 / n_2$  и  $\bar{G} = G_I / G_{II}$  на эффективность СТП, определяющуюся критериями КПД СТП  $\eta_{СТП}$  и удельного расхода рабочего тела

$(G/N)_{СТП}$ . При этом были приняты значения  $p_{вх}^*_{opt} = 0,5 \text{ МПа}$ ,  $\pi_{СТП} = 9,2$  и  $T_{вх}^* = 450 \text{ К}$ .

Для увеличения точности эмпирических математических моделей широкий диапазон возможных мощностей был разбит на два диапазона:  $N_I = 0,1 \dots 1 \text{ кВт}$  (класс турбин сверхмалой мощности [2]) и  $N_I = 1 \dots 7 \text{ кВт}$  (малоразмерные турбины).

Условие  $G_I = G_{II}$  соблюдалось во всех опытах. Было выявлено взаимовлияние параметров  $N_I$  и  $\bar{N}$ , и тот факт, что энергетическая эффективность увеличивается с ростом  $N_I$  и при приближении  $\bar{N}$  к 1. Таким образом, чем меньше разница между  $N_I$  и  $N_{II}$ , тем экономичнее оказывается система турбоприводов. При  $N_I = 0,1 \dots 1 \text{ кВт}$  оптимальное значение  $\bar{N} = 1$ , тогда как при  $N_I = 1 \dots 7 \text{ кВт}$  наилучшее распределение  $\bar{N} = 0,5$ , т.е.  $N_{II} = 2 \dots 14 \text{ кВт}$ .

В ряде случаев  $\eta_{СТПmax}$  обеспечивается при несоблюдении равенства  $G_I = G_{II}$ . Было проведено исследование влияния распределения расходов  $\bar{G}$  на экономичность СТП, выявившее закономерность  $\bar{G}_{opt} = \bar{N}$ .

Приведённые рекомендации справедливы для системы турбогенераторов с суммарной мощностью до 50 кВт, но нуждаются в дальнейшем уточнении взаимовлияния термодинамических и режимных параметров на её энергетическую эффективность.

#### Библиографический список

1. Фокин Г.А. Автономные источники электрической и тепловой энергии для магистральных газопроводов и газораспределительных станций / Монография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 164 с.
2. [Kalabukhov D. S.](#) Selecting the best ultralow-power turbine at the conceptual-design stage / Kalabukhov D.S., Martynov A.A. // Russian Engineering Research 2017. Vol. 37. Issue 4. P. 300-309.
3. Обзор современных конструкций турбодетандерных генераторов / Спб: ООО НТЦ «МТТ», 2011. 90 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://stc-mtt.ru/wp-content/uploads/2011/05/0000x.pdf> (дата обращения 03.03.2018).