

## Моделирование насосных агрегатов с использованием языка Simscape Matlab / Simulink

*Н.Г. Диденко, А.В. Молодых*

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ*

*«МИСиС», г. Старый Оскол, Россия*

**Аннотация:** Процессы перекачки жидкости, требующие изменения расхода в широком диапазоне, часто оснащаются параллельно подключенными центробежными насосами. В таких насосных системах регулирование частоты вращения позволяет обеспечить требуемую производительность при различном количестве работающих насосных агрегатов и выбранных значениях частоты вращения. Информация, необходимая для моделирования подобных систем, применяемых для очистки сточных вод и в различных задачах по охлаждению и подаче воды, может быть недостаточной, а отсутствие мониторинга рабочих точек в реальном времени часто устанавливает ограничения для точной оптимизации энергоэффективности. Следовательно, необходимы легко реализуемые стратегии управления, которые могут быть приняты при минимальных данных о системе, что требует применения адаптивных методов.

**Ключевые слова:** Насосные агрегаты; энергоэффективность; моделирование; частота вращения; регулирование скорости.

На большей части насосных станций, используемых для перекачки воды и других жидкостей, применяются насосы центробежного типа [1]. Поскольку во многих случаях расход перекачиваемых жидкостей изменяется в весьма широких пределах, для обеспечения требуемого давления в напорном трубопроводе используется параллельное подключение насосов. В настоящее время применяются два принципиально различных способа регулирования давления при работе насосных агрегатов: дросселирование, когда приводной двигатель насоса работает напрямую от сети, а необходимая величина давления в напорном трубопроводе обеспечивается изменением положения регулирующей арматуры (задвижек) и частотное регулирование, при котором необходимая величина напора обеспечивается изменением частоты питающего напряжения. Несмотря на то, что второй способ связан с большими капитальными затратами из-за необходимости применения преобразователей частоты, его энергоэффективность существенно выше по сравнению с дросселированием. В связи с этим частотное регулирование

---

скорости приводных двигателей насосных агрегатов получает с каждым годом все большее распространение в самых различных отраслях промышленности, а также в жилищно-коммунальном хозяйстве [2]. Однако при параллельной работе насосных агрегатов с частотным регулированием приходится также определять такое их количество, которое обеспечит, во-первых, заданные значения расхода и напора, а во-вторых, минимизировать потребление электроэнергии из сети.

Значительная часть насосных станций работают в условиях, когда расход и требуемое давление изменяются в широких пределах, что может приводить к снижению эффективности управления ими [3] и, как следствие, снижению энергоэффективности. Поэтому следует отметить, что задача выбора оптимальной стратегии управления насосными агрегатами при их параллельной работе является весьма актуальной.

Значительное количество научных работ посвящено оптимальному управлению насосными системами. Для того, чтобы получить лучшие результаты при моделировании и оптимизации работы насосных станций, используются различные математические модели и методы, включая линейное программирование [4], нелинейное программирование [5], жадные алгоритмы [6], динамическое программирование [7], нелинейная эвристическая оптимизация [8] и т. д.

В некоторых работах для оптимизации управления производительностью насоса предлагается применять интеллектуальные алгоритмы, такие, как: генетические [9], многокритериальные эволюционные [10], адаптивные и производные [11], нечеткая логика [12].

Для управления двумя и более параллельно работающими насосами применяются два принципиально отличающихся метода управления: каскадный (каскадно-частотный) и синхронный (параллельно-частотный). В каскадно-частотном режиме регулируемым является только один из

---

работающих насосных агрегатов, остальные включаются в работу с прямым питанием от сети при невозможности регулируемым агрегатом обеспечить требуемую величину давления в напорном трубопроводе. При параллельно-частотном (синхронном) способе регулирования все работающие насосные агрегаты работают с одинаковой частотой вращения, при этом их количество определяется текущим значением расхода и требуемым значением напора. Выбор конкретного режима управления насосными агрегатами зависит от множества факторов и должен определяться, исходя из условия максимально возможной энергоэффективности.

Для возможности сравнения различных режимов работы параллельно включенных насосных агрегатов при широком диапазоне изменения влияющих факторов целесообразно разработать модель «насосная станция – трубопровод – потребитель» в среде MATLAB / Simulink, позволяющей проводить имитационное моделирование различных физических процессов. Поскольку в процессе моделирования необходимо контролировать величины различных типов: электрические (напряжение, частоту, потребляемую мощность) и гидравлические (напор, расход) целесообразно использовать при этом язык Simscape среды MATLAB/ Simulink, который позволяет создавать модели, объединяя разные физические среды (электрическую, механическую, гидравлическую и т. д.).

В качестве примера была разработана модель насоса с электроприводом, работающим при постоянной частоте. Объектом моделирования был выбран насос Grundfos серии TP 32-150/2 с электродвигателем мощностью 370 Вт и номинальной частотой вращения 2880 об/мин. В таблице № 1 приведены технические данные данного насоса и его приводного двигателя.

Таблица № 2

---

### Технические данные насоса и его приводного двигателя

Тип двигателя	MG71A2-14FT85-C
Мощность двигателя, кВт	0,37
Номинальная частота вращения двигателя, об/мин	2880
Номинальный ток двигателя при напряжении 380 В, А	1
КПД двигателя, %	73,8
Момент инерции двигателя, кг·м <sup>2</sup>	0,0005
Тип насоса	ТР 32-150/2
Общий напор насоса, м	10
Номинальная частота вращения насоса, об/мин	2865
Паспортный расход насоса, м <sup>3</sup> /ч	6,2
Максимальный напор насоса, м	15

Разработанная модель включает в себя следующие элементы (рис.1): электрическую сеть, асинхронный электродвигатель, блок момента инерции, блок свойств жидкости, центробежный насос, трубопровод с переменным сечением (для имитации изменения гидравлической нагрузки), расходомер, датчик давления. Поскольку основными характеристиками насосных агрегатов являются зависимости создаваемого напора от расхода жидкости, перекачиваемой насосом (Q-H характеристика), а также потребляемой электрической мощности от расхода (Q-P характеристика), то для проверки соответствия модели реальному объекту подобные характеристики были сняты путем изменения в процессе моделирования сечения трубопровода. Для получения данных характеристик в модель включены измерительные приборы, фиксирующие изменение расхода, напора и мощности во времени, а также их зависимость друг от друга.

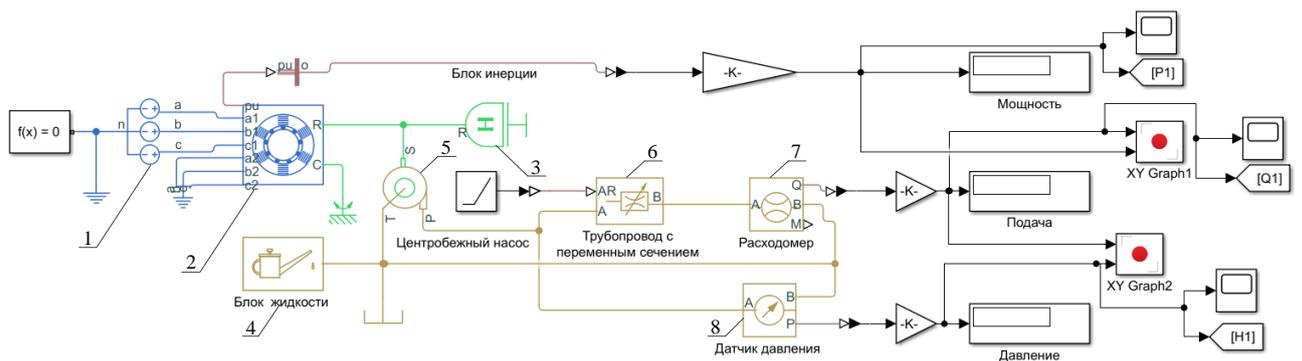


Рис. 1. – Модель центробежного насоса с электроприводом: 1 – электрическая сеть, 2 – асинхронный электродвигатель, 3 – блок момента инерции, 4 – блок свойств жидкости, 5 – центробежный насос, 6 – трубопровод с переменным сечением, 7 – расходомер, 8 – датчик давления (манометр)

Графики Q-H и Q-P характеристик, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 2 и рис. 3

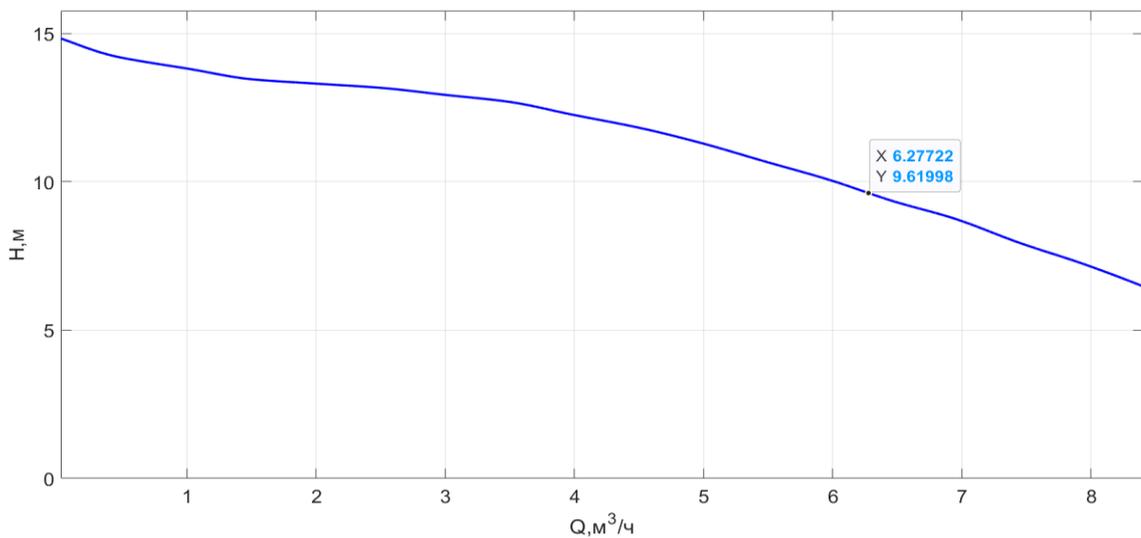


Рис. 2. – Q-H характеристика насоса, полученная в результате моделирования

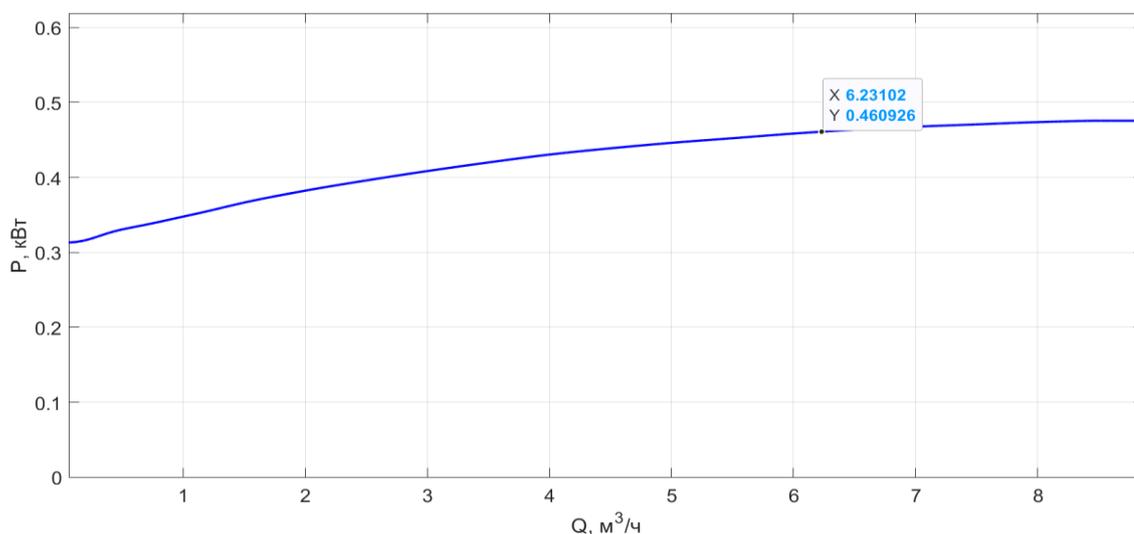


Рис. 2. – Q-P характеристика насоса, полученная в результате моделирования

Для сравнения на рис. 3 и рис. 4 приведены аналогичные характеристики рассматриваемого насоса, предоставленные производителем [13]. Сопоставление графиков показывает, что расхождение между паспортными характеристиками и характеристиками, полученными по модели, не превышает 3 %.

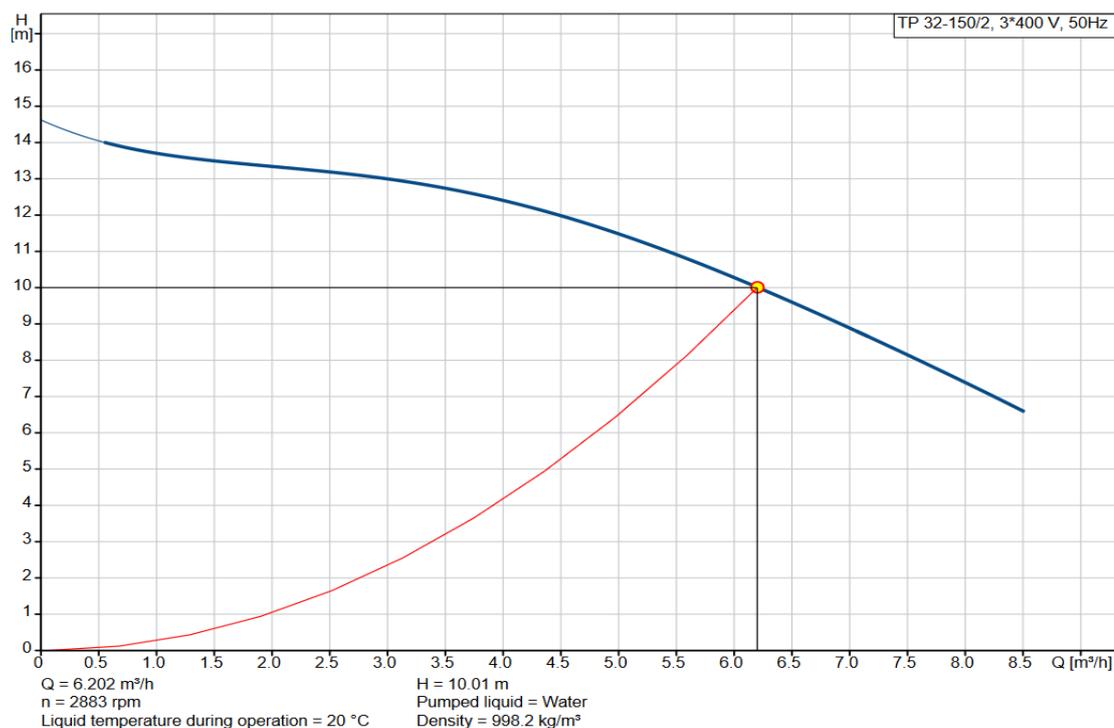


Рис. 3. – Q-H характеристика насоса, предоставленная производителем

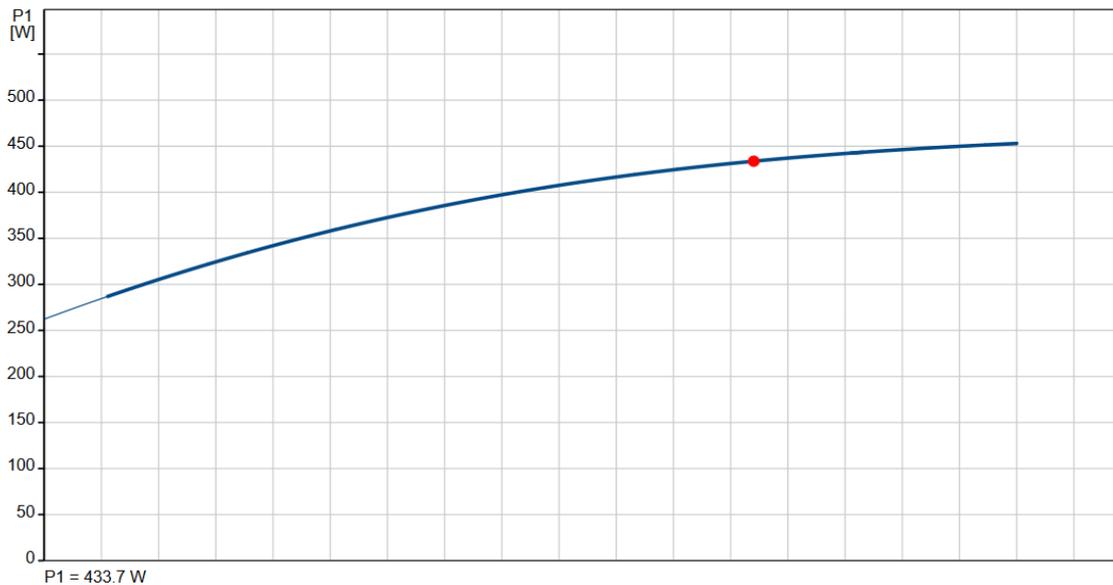


Рис. 4. – Q-P характеристика насоса, предоставленная производителем

Анализ результатов выполненной работы показывает, что модель, разработанная на языке Simscape MATLAB / Simulink, в достаточной мере соответствует реальному физическому объекту и может быть использована для сравнительного анализа энергоэффективности различных способов управления насосными агрегатами.

### Литература

1. Поспеев Ю.М., Савчиц А.В. Система автоматической диагностики насосных агрегатов с центробежными насосами // Инженерный вестник Дона. 2018. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4960](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4960).

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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7535).

3. Wu, P., Lai, Z., Wu, D., Wang, L. Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2014. Vol. 141. № 8. Pp. 04014094-1–04014094-8. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493.
  4. Burnell, D., Race, J., and Evans, P. An overview of the trunk scheduling system for the london ring main. *Water Sci. Technol.* 1993. Vol. 28. № 11–12. Pp. 99–109.
  5. Yu, G., Powell, R.S., and Sterling, M.J.H. Optimized pump scheduling in water distribution systems. *J. Optim. Theor. Appl.* 1994. Vol. 83. № 3. Pp. 463–488.
  6. Giacomello, C., Kapelan, Z., and Nicolini, M. Fast hybrid optimization method for effective pump scheduling. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2013. Vol. 139. № 2. Pp. 175–183. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000239.
  7. Zhao, T., Cai, X., Lei, X., and Wang, H. Improved dynamic programming for reservoir operation optimization with a concave objective function. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2012. Vol. 138. № 6. Pp. 590–596. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000205.
  8. Le´on, C., Mart´ın, S., Elena, J., and Luque, J. EXPLORE-Hybrid expert system for water networks management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2000. Vol. 126. № 2. Pp. 65–74. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:2(65).
  9. Yi Wang, Liang Cao Shu. The optimization of genetic algorithms running in parallel pump system. *Fluid Machin.* 2003. Vol. 31. № 10. (in Chinese). Pp. 59–68.
  10. Bar´an B, von L¨ucken C, Sotelo A. Multi-objective pump scheduling optimization using evolutionary strategies. *Adv Eng Softw.* 2005. Vol. 36. № 1. Pp. 39–47.
-

11. Wang S, Burnett J. Online adaptive control for optimizing variable-speed pumps of indirect water-cooled chilling systems. *Appl Therm Eng.* 2001. Vol. 21. № 11. Pp. 1083–1103.

12. Angel, P., Hernandez, J., and Agudelo, R. Fuzzy expert system model for the operation of an urban water supply system. *Comput. Control Water Ind.* 1999. Vol. 1. Pp. 449–457.

13. Официальный сайт компании Grundfos в России. URL://product-selection.grundfos.com/ru/products/tp-tpe/tp-b-i/tp-32-1502-99221981?tab=variant-curves&pumpsystemid=1707822742 (дата обращения: 18.03.2023).

### References

1. Pospееv Yu.M., Savchicz A.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4960.

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

3. Wu, P., Lai, Z., Wu, D., Wang, L. *Journal of Water Resources Planning and Management.* 2014. Vol. 141. № 8. Pp. 04014094-1–04014094-8. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493.

4. Burnell, D., Race, J., and Evans, P. *Water Sci. Technol.* 1993. Vol. 28. № 11–12. Pp. 99–109.

5. Yu, G., Powell, R.S., and Sterling, M.J.H. *J. Optim. Theor. Appl.* 1994. Vol. 83. № 3. Pp. 463–488.

6. Giacomello, C., Kapelan, Z., and Nicolini, M. *Journal of Water Resources Planning and Management.* 2013. Vol. 139. № 2. Pp. 175–183. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000239.

7. Zhao, T., Cai, X., Lei, X., and Wang, H. Improved dynamic programming for reservoir operation optimization with a concave objective



function. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2012. Vol. 138. № 6. Pp. 590–596. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000205.

8. Le'on, C., Martín, S., Elena, J., and Luque, J. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2000. Vol. 126. № 2. Pp. 65–74. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:2(65).

9. Yi Wang, Liang Cao Shu. *Fluid Machin.* 2003. Vol. 31. № 10. (in Chinese). Pp. 59–68.

10. Barán B, von Lücken C, Sotelo A. *Adv Eng Softw.* 2005. Vol. 36. № 1. Pp. 39–47.

11. Wang S, Burnett J. *Appl Therm Eng.* 2001. Vol. 21. № 11. Pp. 1083–1103.

12. Angel, P., Hernandez, J., and Agudelo, R. *Comput. Control Water Ind.* 1999. Vol. 1. Pp. 449–457.

13. Oficial'ny`j sajt kompanii Grundfos v Rossii [The official website of Grundfos in Russia]. URL: [product-selection.grundfos.com/ru/products/tp-tpe/tp-b-i/tp-32-1502-99221981?tab=variant-curves&pumpsystemid=1707822742](http://product-selection.grundfos.com/ru/products/tp-tpe/tp-b-i/tp-32-1502-99221981?tab=variant-curves&pumpsystemid=1707822742) (Date accessed: 03.18.2023).