

# Адаптивный метод выбора кривых напорных характеристик для регулируемых циркуляционных насосов

*Carsten Skovmose Kallesøe\*, Niels Bidstrup\*, Manfred Bayer*

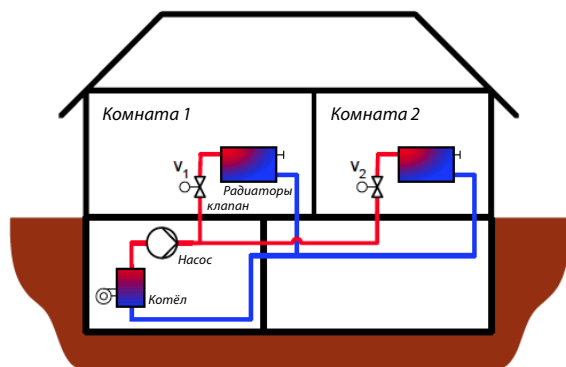
## Краткий обзор

Насосы с регулируемой частотой вращения двигателя для бытовых систем отопления существуют на рынке еще с начала девяностых. Большинство таких насосов оснащены встроенными алгоритмами расчёта кривых регулирования, которые задают скорость и давление жидкости в системе в соотношении с текущей тепловой нагрузкой. Циркуляционные насосы обычно имеют много кривых регулирования, что дает им возможность приспособиться к изменениям систем отопления. Благодаря этому повышается комфорт и снижается потребление энергии. Чтобы воспользоваться возможностью оптимизации работы насоса, после его установки необходимо провести надлежащую настройку, выбрав оптимальную кривую регулирования. Раньше, в большинстве случаев это было невозможно, так как информация о специфике каждой отдельной системы отопления была недоступна. В этом обучающем материале описан новый метод регулирования — *AUTOADAPT*, автоматически приспособляющий настройки насоса к системе отопления, в которой он установлен. Циркуляционные насосы с функцией *AUTOADAPT* измеряют и анализируют характеристики системы отопления, соответствующим образом настраивая кривую регулирования насоса. В Германии были проведены рабочие испытания, которые показали, что в 75 % случаев *AUTOADAPT* выбрал настройку с более низким потреблением энергии, не снизив при этом уровень теплоотдачи ниже комфортной.

\* Grundfos Management A/S, Poul Due Jensens Vej 7, DK-8850 Bjerringbro, Дания (эл. почта: {ckallesoe,nbidstrup}@grundfos.com)

## 1. Введение

Циркуляционные насосы используются во всех водяных системах отопления. Такие системы включают в себя системы радиаторов и контур обогрева пола. Источником тепла могут быть бойлеры, солнечный свет, тепловые насосы и т. д. Вне зависимости от конфигурации системы задача циркуляционного насоса остается неизменной. Она состоит в обеспечении необходимого давления теплоносителя для управления отоплением и контроля за количеством тепла поступающего в помещения. Пример упрощенной схемы с радиаторным обогревом посредством котла приведена на *рис. 1*.

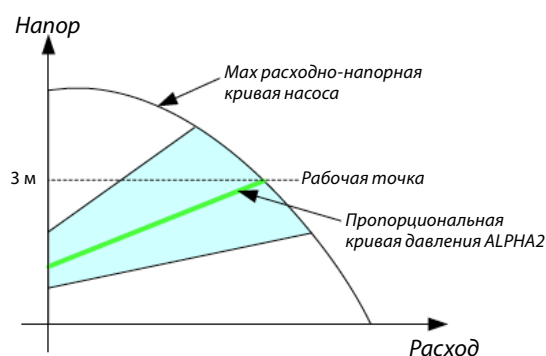


*Рис. 1:* Схема двухтрубной системой отопления в доме с двумя комнатами.

Система отопления, изображенная на этом рисунке, является двухтрубной системой, которая управляется при помощи термостатических клапанов. Задачей центральной системы отопления является поддержание заданной пользователем температуры в каждом из помещений. Температуру регулирует термостатический клапан, а источником тепла выступает радиатор, как указано на *рис. 1*. Тепловая энергия, подаваемая в комнату зависит от температуры и скорости движения воды, проходящей через радиатор. Источник тепла (на *рис. 1* — котёл) определяет температуру теплоносителя, а термостатический клапан — его скорость.

В примере, приведенном на *рис. 1*, задано такое значение температуры котла, чтобы радиаторы могли доставить необходимый объем тепла во весь дом. Тем не менее, потребность в тепле в разных комнатах может быть различной (см. *рис. 1*). Термостатические клапаны справляются с различным потреблением тепла. Изменяя скорость движения теплоносителя для каждого радиатора, можно задавать количество передаваемого ими тепла, регулируя таким образом температуру в каждом помещении дома по отдельности. Этот способ используется для управления температурой помещений в большинстве центральных систем отопления.

Для выполнения своей функции термостатическим клапанам необходимо поддержание давления. Это давление обеспечивает циркуляционный насос. Ему приходится преодолевать гидравлическое сопротивление трубопровода и создавать достаточный уровень давления, чтобы задействовать термостатические клапаны. Сегодня высококлассные циркуляционные насосы оснащены встроенным регулированием скорости. Эта технология используется для уменьшения давления при частичной нагрузке. Она экономит энергию и улучшает производительность термостатических клапанов. В циркуляционных насосах уменьшение давления при частичной нагрузке обеспечивает пропорциональная кривая давления. Исходная пропорциональная кривая давления насоса ALPHA2 с напором 6 м изображена на *рис. 2*.



*Рис. 2:* График расходно-напорных характеристик насоса ALPHA2. Светло-синяя подобласть — область действия функции AUTOADAPT, в которой выбирается соответствующая пропорциональная кривая давления в зависимости от типа и размера центральной системы отопления.

Циркуляционные насосы со встроенным частотным регулированием представлены на рынке уже много лет. Это — проверенная технология. Чтобы полностью использовать потенциал циркуляционных насосов с регулируемой скоростью, важно правильно подобрать напорную кривую для конкретной системы отопления. Выбор кривой регулировки должен основываться на гидравлическом расчете параметров трубопровода, радиаторов и источника тепла системы (котла). Важно отметить, что качество теплоизоляции в доме (потеря тепла) влияет на оптимальное расположение кривой характеристики насоса. Следовательно, кривую регулировки необходимо выбирать на основе данных, которыми обычный монтажник может и не располагать. Поэтому большое количество циркуляционных насосов работают по повышенной напорной кривой, выбранной монтажником «с запасом».

В помощь монтажникам мы предлагаем адаптивный алгоритм под названием AUTOADAPT. Эта функция представляет собой алгоритм, который максимально приближает кривую характеристики циркуляционного насоса к кривой, оптимальной для данной системы отопления. Упомянутый алгоритм AUTOADAPT является качественно улучшенной версией алгоритма AUTOADAPT, применявшегося в циркуляционных насосах MAGNA Grundfos с 2001 г.

## 2. Новый алгоритм AUTOADAPT

Как уже было сказано, выбор характеристик циркуляционного насоса влияет на производительность системы отопления и потребление электрической энергии. Поэтому важно правильно подобрать кривую и определить рабочую точку. С помощью AUTOADAPT выбор оптимальной кривой происходит автоматически. Таким образом, при установке циркуляционного насоса работа монтажника сокращается вплоть до монтажа и установки насоса в систему.

В этом разделе рассмотрены функциональные возможности алгоритма AUTOADAPT. Более подробное описание приведено в материалах (Kallesøe and Bidstrup (2008)). Функциональную последовательность работы алгоритма AUTOADAPT можно разделить на три шага, как показано на рис. 3.

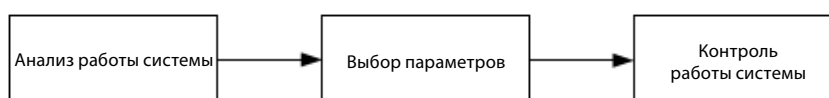


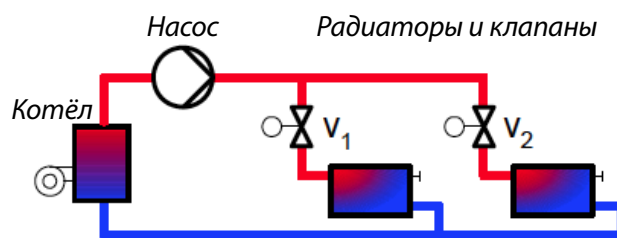
Рис. 3: Структура алгоритма AUTOADAPT. Алгоритм состоит из трех шагов. Первый — анализ работы системы, второй — выбор параметров, третий — контроль работы системы.

Первой задачей является анализ системы отопления, в которую установлен циркуляционный насос. Ее выполняет модуль «Анализатор работы системы». Цель анализа — определить соответствие выбранных параметров в насосе: высокие, низкие или подходящие. Эта задача подробно раскрыта в Разделе 2.1. Второй задачей является использование полученных после диагностики системы параметров для выбора оптимальной пропорциональной кривой давления циркуляционного насоса. Эту функцию осуществляет модуль «Выбор параметров». Подробности в Разделе 2.2. На завершающем этапе циркуляционный насос регулируется в соответствии с выбранной пропорциональной кривой давления. Такая кривая показана на рис. 2. Рассмотрим первые два шага более подробно. См. рис. 3.

### 2.1. Анализ работы системы

Первым шагом в алгоритме AUTOADAPT является оценка давления в системе отопления. Анализ работы системы построен на основе данных встроенного журнала регистрации изменений профиля нагрузки системы отопления.

Чтобы понять этот принцип, сначала необходимо разобраться, как режимы нагрузки влияют на скорость теплоносителя и давление, создаваемое циркуляционным насосом. С помощью примера системы отопления можно показать связь между режимами нагрузки и поведением клапана, см. *рис. 4*. Более подробное объяснение работы системы отопления приводится в следующих работах (Otto (1991), Petitjean (1994), Tiator (1998)).



*Рис. 4: Схема двухтрубной центральной системы отопления с термостатическими клапанами.*

При постоянной температуре котла, теплопередача регулируется изменением скорости прохождения воды через радиаторы. Термостатические клапаны изменяют объем пропускаемой воды, контролируя перепад давления. Поэтому, если давление, создаваемое циркуляционным насосом, слишком высокое, то и перепад давления в клапанах также будет очень резким. По сути это означает, что большую часть времени клапан почти закрыт, что снижает качество регулирования температуры, а, следовательно, и уровень комфорта. Более того, в таком случае могут возникнуть вибрации (Andersen и др., 2000), а также акустические шумы. Давление приводящее к таким последствиям называют избыточным. В противоположном случае, если давление циркуляционного насоса слишком низкое, то и перепад давления в клапанах окажется незначительным. Это означает, что клапаны должны быть большую часть времени открытыми почти полностью, а это значит, что практически отсутствует возможность регулировки температуры.

Определение параметров клапана всегда осуществляется при номинальном расходе теплоносителя, который требуется радиатору. Чтобы выяснить, как долго клапан будет открытым, необходимо знать полное сопротивление контура. Сопротивление контура включает в себя все гидравлические потери в системе при заданном расходе. Речь идёт о потерях в теплообменнике котла, трубах и клапанах (см. *рис. 4*). Так как потери в теплообменнике котла и трубах при заданном расходе постоянны, то единственным, что может повлиять на гидравлическое сопротивление системы — это изменение положения штока в клапанах. Полное гидравлическое сопротивление может быть найдено благодаря измерениям датчиков, встроенных в насос. Коэффициент гидравлического сопротивления системы рассчитывается по следующей формуле:

$$k_{sys} = \frac{\text{расход}}{\sqrt{\text{давление}}}$$

где значение  $k_{sys}$  — коэффициент гидравлического сопротивления, расход — расход теплоносителя через насос, а давление — давление, создаваемое насосом. Значение  $k_{sys}$  формирует основу для анализа, проводимого в ходе алгоритма AUTOADAPT.

Чтобы объяснить функциональные возможности Анализатора системы в алгоритме AUTOADAPT, приводим *рис. 5*, *рис. 6* и *рис. 7*. На этих рисунках зеленая кривая показывает изменения значения  $k_{sys}$  во времени. Красная и синяя кривые являются максимумом и минимумом значения  $k_{sys}$ . Здесь они обозначены  $k_{high}$  и  $k_{low}$  соответственно. Черная кривая разделяет область между красной и синей кривыми на две подобласти, обозначенные — область А и область В. Черная кривая обозначена как  $k_{ref}$  и рассчитывается из значений  $k_{high}$  и  $k_{low}$ . Уровень насыщения можно измерить методом сравнения времени нахождения показателя  $k_{sys}$  в подобласти А и В. На *рис. 5*, *рис. 6* и *рис. 7* показаны кривые для трех разных ситуаций.

На рис. 5 давление циркуляционного насоса слишком низкое, и давление в клапанах также низкое. Как рассматривалось ранее, если давление в системе слишком низкое, клапаны не способны регулировать температуру должным образом. На рис. 5 показаны условия низкого давления, при которых время нахождения значения  $k_{sys}$  (зеленая кривая) в области В больше, чем в области А. Назовем это восходящим насыщением.

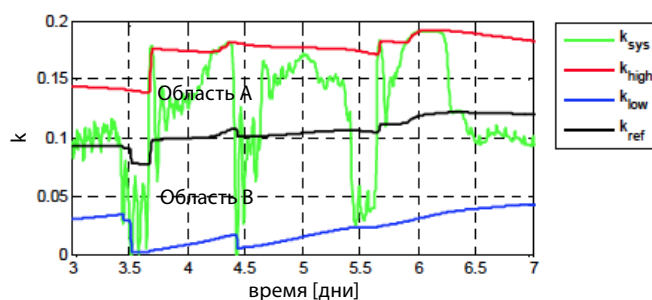


Рис. 5: Пример временного интервала значений  $k_{sys}$  в системе отопления, где насыщение происходит при почти полностью открытом клапане

На рис. 6 представлена другая ситуация. Здесь давление циркуляционного насоса слишком высокое. Подобная ситуация опять-таки приводит к плохому регулированию температуры. При избыточном давлении в системе (см. рис. 6) значение  $k_{sys}$  (зеленая кривая) находится в области А в течение большего промежутка времени, чем в области В. Назовем это явление нисходящим насыщением.

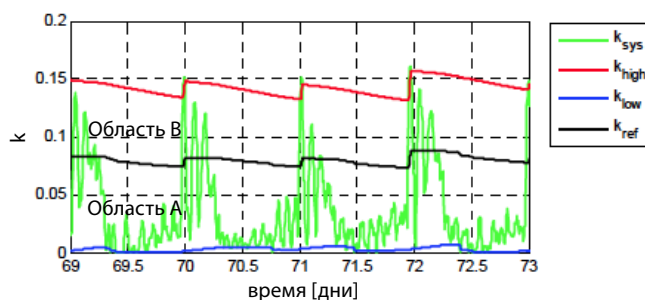


Рис. 6: Пример временного интервала значений  $k_{sys}$  в системе отопления, где насыщение происходит при почти полностью закрытом клапане.

Если в системе отопления давление подходящее, время нахождения значения  $k_{sys}$  в области В такое же, как и время нахождения в области А. Это изображено на рис. 7.

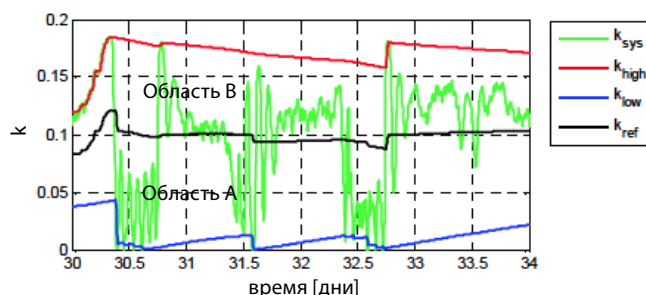


Рис. 7: Пример временного интервала значений  $k_{sys}$  в системе отопления, где насыщение не происходит.

По *рис. 5, рис. 6 и рис. 7* видно, что существуют различные системы : с восходящим и нисходящим насыщениями, и без насыщения. Это применяется в алгоритме *AUTOADAPT* для принятия решения о том, чтобы повысить давление, понизить, или оставить без изменений.

## 2.2. Выбор параметров

С помощью алгоритма *AUTOADAPT* регулировка давления происходит по пропорциональной кривой давления. Это означает, что задачей шага «Выбор параметров» является выбор оптимальных параметров напора и расхода на пропорциональной кривой давления для данной системы отопления. Шаг «Выбор параметров» определяет одну из пропорциональных кривых давления, находящихся в синей области (см. *рис. 2*).

Оптимальная рабочая точка на пропорциональной кривой давления определяется на основе результатов анализа, полученных Анализатором системы (см. раздел 2.1). То есть, если нагнетаемое насосом давление слишком низкое, система отопления не сможет обеспечить достаточное количество тепла. Поэтому клапаны в системе должны быть почти полностью открыты большую часть времени, чтобы поддержать восходящее насыщение. Пример этого показан на *рис. 5*. Чтобы избежать подобной ситуации необходимо увеличить давление в системе, и, следовательно, пропорциональная кривая давления будет выбрана выше начальной. Именно это делает алгоритм *AUTOADAPT*.

В противоположной ситуации — давление слишком высокое, и чтобы предотвратить риск того, что система обеспечит чрезмерным количеством тепла, клапаны остаются закрытыми большую часть времени. Пример этого показан на *рис. 6*. Чтобы избежать подобной ситуации необходимо уменьшить давление в системе, и, следовательно, пропорциональная кривая давления будет выбрана ниже начальной. И снова именно это делает алгоритм *AUTOADAPT*.

Если кривая  $k_{sys}$  равномерно распределена между областями А и В, система не насыщена, как показано на *рис. 7*, нет необходимости изменять давление. Следовательно, алгоритм *AUTOADAPT* не изменяет позиции пропорциональной кривой давления.

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлен алгоритм работы системы с функцией *AUTOADAPT* для малых циркуляционных насосов. Этот алгоритм подбирает оптимальную кривую давления циркуляционного насоса для каждой конкретной системы, в которой установлен данный насос. Тем самым значительно упрощен подбор и монтаж насосов с регулируемой частотой вращения, так как монтажнику нет необходимости рассчитывать оптимальную рабочую точку насоса.

Алгоритм *AUTOADAPT* был испытан на 120 объектах в Германии. Результаты испытаний показали, что работа функции *AUTOADAPT* значительно упрощает выбор и настройку насоса и позволяет пользователю экономить сбережения. К тому же, в ходе испытаний было выявлено, что для 75,2 % систем отопления функция *AUTOADAPT* уменьшила давление в системе в сравнении с исходным выбором параметров насоса ALPHA2. Поэтому потребление электроэнергии снизилось на 75,2 % всех объектов без влияния на комфорт. Только на 11,4 % объектов функция *AUTOADAPT* повысила давление в сравнении со стандартной настройкой циркуляционного насоса ALPHA2. Если же установлен насос без функции *AUTOADAPT*, то необходимо вручную настраивать оптимальный режим работы насосов для каждой системы. Статистика показывает, что используя насосы с функцией *AUTOADAPT*, возможно уменьшить потребление электроэнергии без влияния на комфорт.

В представленных материалах работа алгоритма AUTOADAPT объяснена на примере двухтрубной системы отопления с термостатическими клапанами. Выше описанные испытания проводились для различных систем отопления: одноконтурных и двухконтурных. К тому же функцию AUTOADAPT можно успешно применять, например, и для систем «теплый пол». Таким образом, алгоритм AUTOADAPT можно и нужно применять для различных систем отопления.

#### 4. ССЫЛКИ

Andersen P., T.S. Pedersen, J. Stoustrup, J. Svendsen, B. Lovmand, N. Bidstrup (2000). Elimination of oscillations in a central heating system using pump control. *In proceedings of the American Control Conference*, 2000.

Ingolf Tiator (1998). *Heizungsanlagen*. Vogel 1998.

Jürgen Otto (1991). *Pumpenheizungen richtig geplant*. Krammer Verlag Düsseldorf, 1991.

Robert Petitjean (1994). *Total Hydronic Balancing*. Tour & Andersson Hydronics AB. 1994

C.S. Kallesøe and N. Bidstrup (2008). Adaptive control of domestic circulators. *Submitted to the International Rotating Equipment conference. Düsseldorf, Germany*. 2008