

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИВОДАМИ НАСОСОВ ПРИ ДРОССЕЛЬНОМ И ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Р.Х. Гумерова, В.А. Черняховский

Казанский национальный исследовательский технический университет имени
А.Н. Туполева – КАИ

rgumerova@mail.ru, chernyahovsky@list.ru

Резюме: Представлен прогноз потребления электроэнергии электроприемниками котельной. Произведено прогнозирование на 5 лет вперед на основе модели, составленной на базе данных среднемесячных температур за 5 последних лет. Описаны исходные данные и решения модели. Дроссельное регулирование производительности насосов сравнивается с базисным вариантом – частотным регулированием. Оценена экономическая выгода применения частотного регулирования. Рассчитаны сроки окупаемости преобразователей частоты.

Ключевые слова: прогноз потребления электроэнергии, MATLAB Simulink, дроссельное регулирование, частотное регулирование, преобразователь частоты, экономическая выгода, срок окупаемости.

MODELLING OF ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION OF ELECTRICAL DRIVES IN THROTTLE AND FREQUENCY REGIMES OF CONTROL

R.H. Gumerova, V.A. Chernyakhovskiy

Kazan National Research Technical University named A.N. Tupolev

rgumerova@mail.ru, chernyahovsky@list.ru

Abstract: The relevance of this work is in development of mathematical model, which shows the advantage of frequency control of engines of pumps over throttle control. The object of study is boiler station of manufacturing plant. The aim of research is to compare two modes of engines of pumps: throttle control and frequency control, evaluation of energy-saving potential and calculation payback period of frequency controllers.

The model was developed in MATLAB Simulink medium. The model was created on the basis of boiler station data. The boiler room includes nine types of pumps. These engines of pumps differ from each other in the manner of work. The monthly average outside temperature is an input parameter of a mathematical model. Temperature of water in supply line and value of pressure vary depending on the outside temperature. Working characteristics of pumps and engines are set with polynomials for throttle and frequency regimes of control. Logic blocks were created to regulate work of pumps depending on monthly average outside temperature. Modeling is prediction of electrical consumption by electrical consumers of boiler station. Time of modelling is 5 year. The modelling process is based on monthly average outside temperature during 5 past years. Averaging of experiments results showed energy-saving potential 11% and effective values of payback times for all frequency controllers.

Keywords: *prediction of consume, MATLAB Simulink, throttle control, frequency control, frequency controller, economic benefit, payback time*

Введение

В настоящее время частотно-регулируемые электроприводы с двигателями переменного тока широко распространены в промышленности. Данные электроприводы включают в себя приводной преобразователь на основе преобразователя частоты со звеном постоянного тока и инвертором с широтно-импульсной модуляцией. Популярность частотно-регулируемого электропривода обуславливается возможностью плавного изменения частоты вращения ротора, как выше, так и ниже номинала, и системой управления с внешним интерфейсом, предоставляющим пользователю максимум возможностей для применения приводов в различных отраслях промышленности [1].

Сегодня электротехническими фирмами всего мира серийно выпускаются электроприводы с векторным управлением, принципы которого были разработаны в 70-х годах XX в. [2]. Прямое управление моментом является дальнейшим развитием концепции векторного управления. Первые публикации относятся к 1985 г., и уже через 10 лет опубликованы сообщения о первых промышленных образцах электроприводов, построенных на принципах прямого управления моментом [2 – 4].

Применение частотного регулирования способно в значительной мере снизить электропотребление асинхронными двигателями. По данным фирмы *GRUNDFOS*, при снижении расхода жидкости на 20% относительная потребляемая двигателем насоса мощность при регулировании скорости вращения ротора частотным преобразователем составляет 65%, тогда как при изменении сечения трубопровода дроссельной задвижкой этот показатель составляет 94% [5].

Несмотря на очевидное преимущество частотного регулирования производительности насосов, снабженных асинхронными двигателями, на сегодняшний день все еще находятся в эксплуатации котельные и насосные станции, имеющие регулирование производительности дросселем, байпасом или изменением диаметра (обточкой) рабочего колеса, то есть с помощью устаревшего оборудования. Объясняется это малыми инвестиционными вложениями. Однако поиск инвесторов – это половина проблемы, встающей перед руководством: зачастую необходимо представить технико-экономическое обоснование предлагаемого проекта и расчет срока окупаемости оборудования.

Объектом исследования является котельная АО «Комбинат автомобильных фургонов» (далее АО «КАФ») города Шумерля. Предметом исследования является математическая модель потребления электроэнергии приемниками котельной при дроссельном и частотном регулировании производительности насосов. Цель работы заключается в прогнозировании потребления электроэнергии приемниками котельной на 5 лет вперед, в зависимости от температуры внешней среды при дроссельном и частотном регулировании производительности насосов и расчете срока окупаемости частотных преобразователей. Новизна заключается в эксперименте, поставленном на математической модели, созданной в среде *MATLAB Simulink*. Значимость данной работы заключается в следующих возможностях модели: экспериментально подтвердить энергосберегающее преимущество частотного регулирования производительности насосов, снабженных асинхронным двигателем; спрогнозировать потребление электрической энергии приемниками котельной в зависимости от температуры внешней среды; рассчитывать выгоду применения частотного регулирования за время моделирования; оценить энергосберегающий потенциал частотного регулирования; рассчитать сроки окупаемости частотных преобразователей. Кроме вышперечисленного, разработанная модель может быть применена в целях обоснования частотного регулирования насосов котельных и

насосных станций. Архитектура и решения данной модели могут лечь в основу построения других математических моделей.

Математическая модель построена на основе данных оборудования котельной АО «КАФ». Двигатели насосов котельной снабжены частотно-регулируемым приводом. Действующая котельная введена в эксплуатацию в 2014 г. Ранее функционирующая котельная законсервирована. Её оборудование нами предложено к использованию при создании системы очистки и рекуперации воды горячего водоснабжения (далее ГВС) [6]. Так как регулирование производительности насосов старой котельной осуществлялось дроссельной заслонкой, то данный метод выбран для сравнения с частотным регулированием новой котельной. Материал о росте показателей энергетической эффективности котельной после модернизации представлен в работе [7].

Методика исследования

Выделим следующие этапы исследования:

1. Поиск исходных данных, включающих в себя:
 - 1.1. Среднемесячные температуры в регионе географического расположения котельной за последние 5 лет;
 - 1.2. Рабочие характеристики насосов котельной;
 - 1.3. Температурный режим работы электроприемников котельной;
 - 1.4. Данные о преобразователях частоты;
 - 1.5. Действующий тариф расчета за электроэнергию предприятием;
 - 1.6. Данные о прочих электроприемниках котельной.
2. Построение математической модели и задание исходных данных:
 - 2.1. Формирование задающего воздействия системы;
 - 2.2. Задание рабочих характеристик насосов;
 - 2.3. Формирование температурной логики работы насосов;
 - 2.4. Построение системы расчета экономической прибыли при частотном регулировании производительности насосов в сравнении с дроссельным регулированием;
 - 2.5. Реализация системы расчета окупаемости частотных преобразователей.
3. Экспериментальная часть.

Рассмотрим вышеприведенные этапы подробнее.

Среднемесячная температура получена путем усреднения значений средних суточных температур. Средние суточные температуры, в свою очередь, получены путем усреднения значений дневных и вечерних температур. Данные взяты с сайта *GISmeteo* с октября 2011 по октябрь 2016 г. [8].

Рабочими характеристиками насоса являются зависимости напора в трубопроводе H (м.вод.ст.) от производительности насоса Q (м³/ч) и зависимость потребляемой двигателем мощности из сети P (кВт) от производительности насоса Q . Данные зависимости представлены в виде графиков и взяты из каталога инструкций насосов *GRUNDFOS* [9]. Котельная оборудована девятью группами насосов. Техническая информация о насосах представлена в табл. 1.

Таблица 1

Техническая информация о насосах котельной

№ группы	Полное наименование	Мах рабочее давление, МПа	Q_{\max} , м ³ /ч	H_{\max} , м. вод. ст	P_{\max} , кВт
1	<i>GRUNDFOS NB 150-200/224</i>	1,0	300	3,5	4
2	<i>GRUNDFOS UPS 40-60/2F</i>	1,0	14,5	2,8	0,25
3	<i>GRUNDFOS NB 150-250/271</i>	1,0	523	15,5	30
4	<i>GRUNDFOS NB 150-200/218-202</i>	1,0	680	45	90

Продолжение таблицы 1

5	GRUNDFOS UPSD 50-120F	1,0	17	7	0,72
6	GRUNDFOS TPD 32-320/2	1,6	6,3	30,5	2,2
7	GRUNDFOS CR3-10	1,6	1,5	56	0,75
8	GRUNDFOS CR10-6	1,6	7,5	48	2,2
9	GRUNDFOS CR10-4	1,6	7,5	35	1,5

Температурный режим работы электроприемников котельной интересен, главным образом, с точки зрения регулирования работы насосов. Информация о температурных режимах работы групп насосов приведена в табл. 2. Температурный режим работы котлов в зимний отопительный период представлен в табл. 3. Интерес к работе котлов обусловлен необходимостью отражения потребления электроэнергии горелками котлов при включении.

Таблица 2

Температурный режим работы групп насосов котельной

№ группы	Наименование группы	Описание режима работы
1	Насосы котлового контура	Работают при $T_{\text{внешн}} < 10^{\circ}\text{C}$
2	Насосы котлового контура (летнего ГВС)	Работают при $T_{\text{внешн}} > 10^{\circ}\text{C}$
3	Насосы греющего контура системы теплоснабжения	Работают при $T_{\text{внешн}} < 10^{\circ}\text{C}$
4	Сетевые насосы	Работают при $T_{\text{внешн}} < 10^{\circ}\text{C}$
5	Циркуляционный насос сетевого контура (сдвоенный)	Работают всегда, вне зависимости от $T_{\text{внешн}}$
6	Насос циркуляционной системы ГВС (сдвоенный)	Работают всегда, вне зависимости от $T_{\text{внешн}}$
7	Подпиточные насосы (системы ГВС)	Работают редко, вне зависимости от $T_{\text{внешн}}$
8	Подпиточные насосы (греющего контура)	Работают редко, вне зависимости от $T_{\text{внешн}}$
9	Повысительные насосы	Работают редко, вне зависимости от $T_{\text{внешн}}$

Таблица 3

Температурный режим работы котлов

№ п/п	Температурный интервал, $^{\circ}\text{C}$	Количество работающих котлов, шт.
1	[10...-8]	1
2	(-8...-16]	2
3	<-16	3

Котельная оборудована преобразователями частоты фирмы *Danfoss*. Данные взяты с официального сайта ООО «Эстудо» [10]. Цены, указанные в «евро», конвертированы по курсу 1 евро = 68,24 руб. Вся информация приведена в табл. 4.

АО «КАФ» осуществляет оплату за электроэнергию согласно действующему тарифу 2,78 руб./кВт*ч. НДС составляет 18%.

Информация о номинальных мощностях, средневзвешенном $\cos\phi$ и коэффициентах использования прочего электрооборудования котельной (приточная вентиляция, автоматика, освещение, сигнализация и т.д.) взята из проектной документации котельной. Средневзвешенный $\cos\phi=0,7$.

Структурная блок-схема математической модели, отражающая этапы вычислений, показана на рис. 1.

Информация о преобразователях частоты			
№ группы	Наименование преобразователя частоты	Цена, евро с НДС	Цена, руб. с НДС
1	Danfoss VLT HVAC Basic Drive FC 101 4 кВт	742,61	50683
2	Danfoss VLT Micro FC-051 0,37 кВт	100,45	6855
3	Danfoss VLT HVAC Basic Drive FC 101 30 кВт	3162,47	215838
4	Danfoss VLT HVAC Basic Drive FC 101 90 кВт	7527	513717
5	Danfoss VLT Micro FC-051 0,75 кВт	114,92	7843
6	Danfoss VLT Micro FC-051 2,2 кВт	192,86	13162
7	Danfoss VLT Micro FC-051 0,75 кВт	114,92	7843
8	Danfoss VLT Micro FC-051 2,2 кВт	192,86	13162
9	Danfoss VLT Micro FC-051 1,5 кВт	142,91	9753

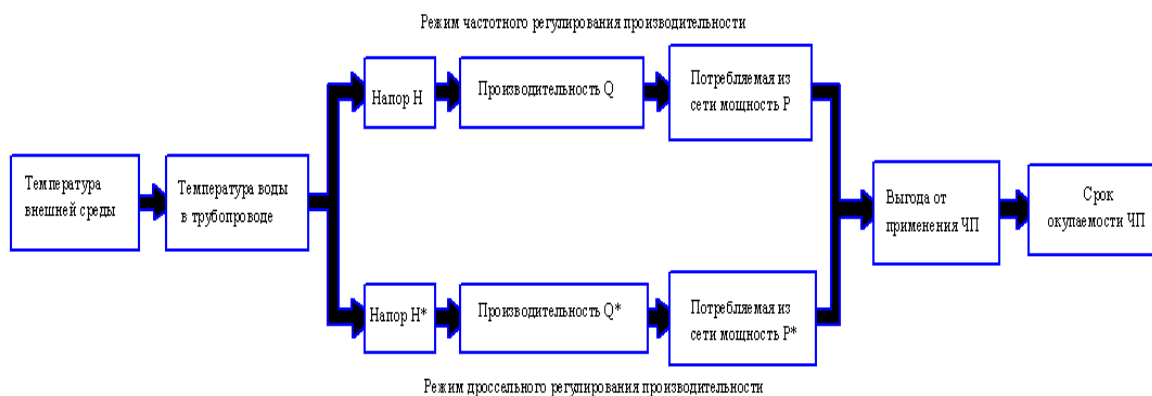


Рис. 1. Структурная блок-схема математической модели: ЧП – частотный преобразователь

Из рис. 1 видно, что задающим воздействием системы является температура. Исходя из цели работы необходимо сформировать задание среднемесячной температуры, случайно изменяющейся в пределах пяти последних лет. Данные о среднемесячных температурах графически представлены на рис. 2. График получен с помощью ПО *Microsoft Excel*.

Уравнение, описывающее полиномиальную аппроксимацию:
 $y = 0,0345x^4 - 0,9244x^3 + 7,2552x^2 - 13,843x - 2,0251$ с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,9917$.

Годовой цикл месяцев реализован блоком «*Repeating Sequence*» раздела «*Sources*» библиотеки «*Simulink*». Линейно возрастающий и мгновенно падающий по достижении двенадцатого месяца сигнал с выхода данного блока поступает на вход блока «*Polynomial*», который содержит уравнение, полученное на рис. 2. Выходной сигнал блока «*Polynomial*» умножается на случайное изменение температуры, заданное блоком «*Uniform Random Number*». Случайные изменения температуры заданы в пределах $[0,75...1,1]$. Таким образом, сформировано задающее воздействие системы в виде случайно изменяющейся среднемесячной температуры.

Идея модели состоит в полиномиальной аппроксимации характеристик. Этот принцип активно применялся для задания рабочих характеристик насоса и двигателя. Приведенные в каталогах кривые $H=f(Q)$ и $P=f(Q)$ характеризуют дроссельное регулирование производительности, т.к. изменяется характеристика трубопровода и рабочая точка «скользит» по рабочей характеристике насоса. Аналогичные рабочие характеристики для режима частотного регулирования получены путем смещения профилей

каталожных характеристик вниз на 20% ниже номинала. Значения потребляемой мощности умножаются на количество рабочих часов в месяц и поступают вместе со значением $\cos\phi$ на блок расчета полной и реактивной мощности.

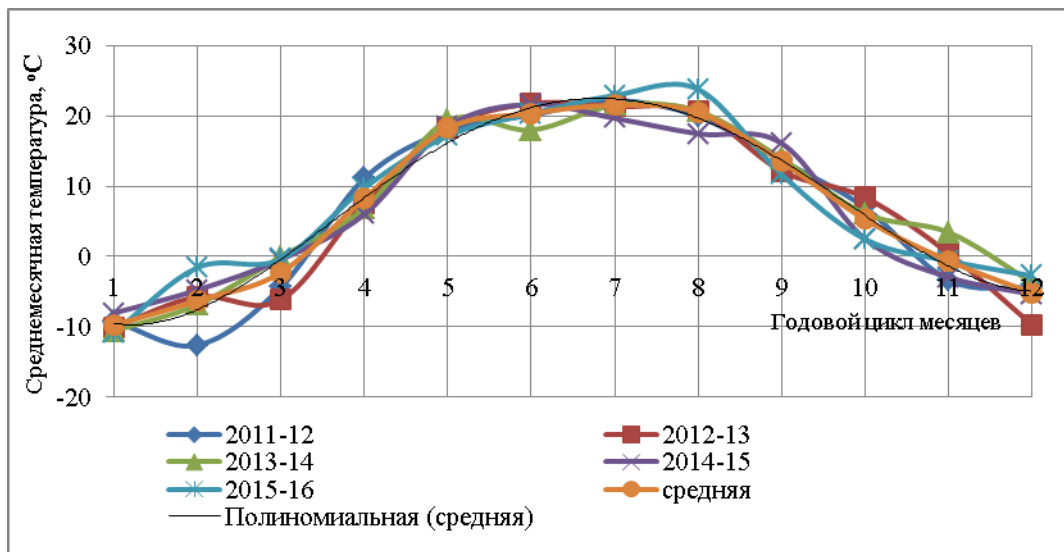


Рис. 2. График среднемесячных температур с октября 2011 г. по октябрь 2016 г.: оранжевая кривая соответствует средним значениям температур за 5 лет, черная тонкая кривая – полиномиальная аппроксимация оранжевой кривой.

Значения температур воды в трубопроводе при определенных температурах внешней среды взяты из температурного режима работы котельной и учтены при построении модели. Значения напоров при определенных температурах воды в трубопроводе учтены из журнала котельной. Зависимости $T_{\text{воды}}=f(T_{\text{внешн}})$ и $H=f(T_{\text{воды}})$ заданы полиномиально.

Формирование температурной логики работы насосов заключается в сравнении температуры внешней среды с установленной. Установка температуры связана с температурными режимами работы насосов, описанных в табл. 3. Например, если температура внешней среды $>10^{\circ}\text{C}$, то на выходе блока «Compare to Constant» формируется логический ноль, который умножается с результатами потребления мощности двигателями насосов четвертой группы. В результате, на выходе логического блока значение потребляемой из сети мощности равно нулю, что соответствует отключению сетевых насосов в режиме летнего ГВС. Логика работы прочих электроприемников котельной, приведенных в табл. 6, реализована аналогично.

Система расчета экономической прибыли при частотном регулировании в сравнении с дроссельным регулированием показана на рис. 3. На вход данной системы непрерывно поступают в течение всего процесса моделирования данные о потреблении электроэнергии всеми приемниками котельной, прошедшие логический контроль, описанный в предыдущем абзаце. На входе системы (на рисунке не указаны) стоят блоки «Integrator», реализующие модель интегрального счетчика. Данная система реализована стандартными блоками. На выход поступают значения об энергосберегающем потенциале (ЭП) частотного регулирования, плате за электроэнергию при частотном и дроссельном регулировании производительности и экономической выгоды от частотного регулирования производительности насосов.

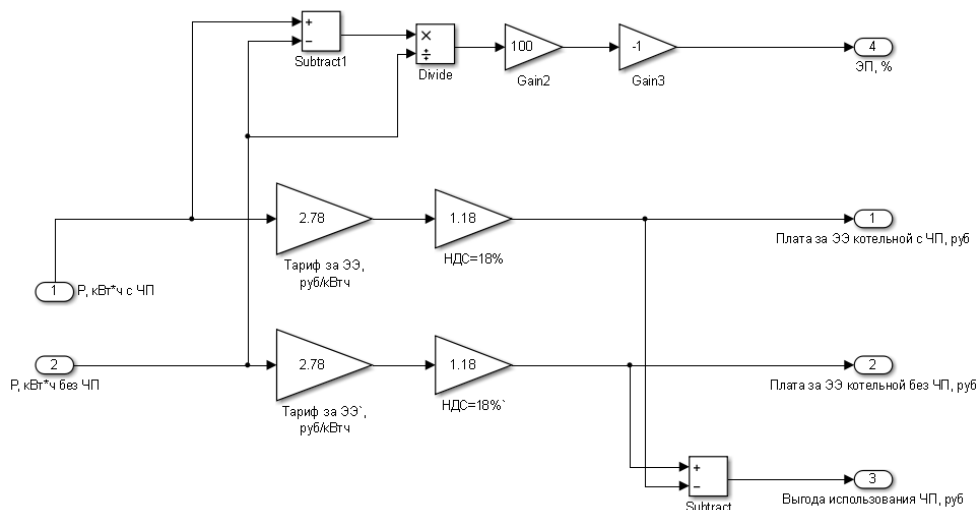


Рис. 3. Система расчета экономической прибыли при частотном регулировании производительности насосов в сравнении с дроссельным регулированием

Энергосберегающий потенциал рассчитывается по формуле:

$$\text{ЭП} = \frac{P_{\text{чр}} - P_{\text{др}}}{P_{\text{др}}} \times 100\% \times (-1), \quad (1)$$

где $P_{\text{чр}}$ и $P_{\text{др}}$ – мощности, потребляемые из сети электроприемниками котельной при частотном и дроссельном регулировании производительности насосов соответственно.

Расчет плата за электроэнергию осуществляется в соответствии с формулой:

$$P = P_{\text{пр}} \cdot T \cdot \text{НДС},$$

где $P_{\text{пр}}$ – прогнозируемая потребляемая мощность в режимах дроссельного и частотного регулирования производительности насосов; T – действующий тариф расчета за электроэнергию; НДС – надбавочная стоимость.

Экономическая выгода рассчитывается как разность между стоимостью электроэнергии, потребленной в режимах дроссельного и частотного регулирования.

Система расчета окупаемости частотных преобразователей показана на рис. 4.

Окупаемость частотного преобразователя рассчитывается блоком «Divide9» по формуле

$$PB = \frac{I_{\text{ОК}}(T/12)}{A}, \quad (2)$$

где PB – срок окупаемости, г.; $I_{\text{ОК}}$ – окупаемые инвестиции, руб (стоимость преобразователя частоты); T – время моделирования, мес.; A – выгода применения частотного преобразователя (руб./Т).

Приведенная формула является несколько измененной для данного случая формулой, описанной М.П. Беловым [11]. Блок «Clock» реализует модель счетчика времени T . Данный блок необходим для расчета чистой годовой прибыли B .

Экспериментальная часть заключается в проведении 50 опытов на математической модели. На основании усреднения результатов вычисляется энергосберегающий потенциал частотного регулирования производительности в сравнении с дроссельным регулированием при смещении рабочих характеристик посредством преобразователей частоты на 20% ниже каталожных. Также рассчитывается окупаемость частотных преобразователей.

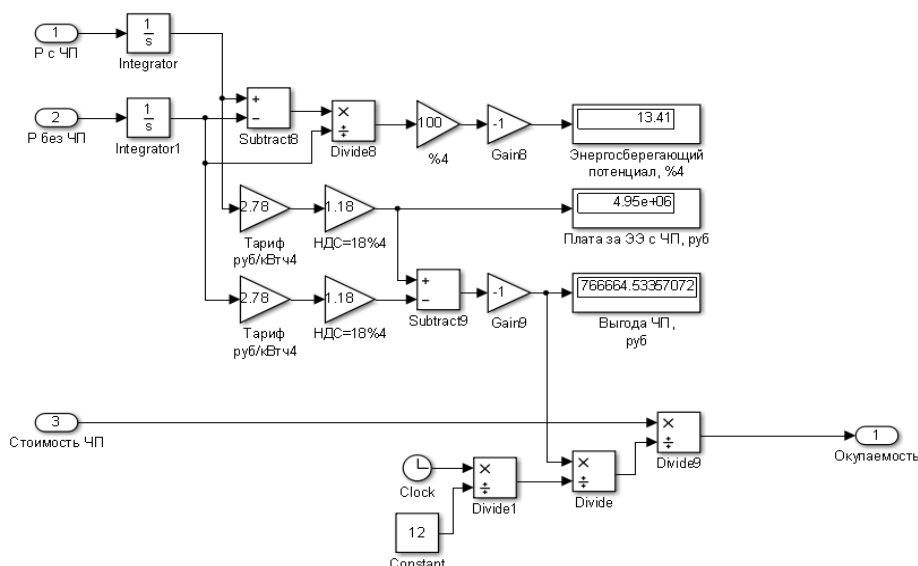


Рис. 4. Система расчета окупаемости частотного преобразователя для 4 группы насосов

Основные результаты

По результату усреднения 50 опытов мощность, потребленная в режиме частотного регулирования производительности насосов на 5 лет вперед, составит 3320,82 тыс. кВт*ч, тогда как при дроссельном регулировании – 3729,14 тыс. кВт*ч. Разница в потреблении составляет 408,32 тыс. кВт*ч, что эквивалентно экономии 1339453 руб. Энергосберегающий потенциал, согласно формуле (1), составит 10,94%.

Сроки окупаемости преобразователей частоты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Сроки окупаемости преобразователей частоты

№ группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Срок окупаемости РВ, г.	1,04	4,22	4,89	3,35	2,09	2,74	3,6	2,58	2,27

Чистая прибыль за 5 лет составит:

$$B = W - C = 1339453 - 838856 = 500597 \text{ руб.},$$

где W – прибыль за 5 лет, полученная путем замены дроссельного регулирования на частотное; C – общая стоимость частотных преобразователей для девяти групп насосов.

График нарастания потребления электрической энергии электроприемниками котельной в режимах дроссельного и частотного регулирования производительности представляет собой линейно нарастающие участки в режиме зимнего отопления и практически пологие участки в режимах летнего ГВС, что соответствует графику мгновенных потреблений. Пиковые зоны с потреблением 95–97 тыс. кВт*ч/мес. в режиме зимнего отопления чередуются с участками равномерного потребления ≈ 3 тыс. кВт*ч/мес. в режиме летнего ГВС. Данные графики в статье не приведены в целях экономии места.

Обсуждение результатов

Модель адекватно предсказывает потребление электроэнергии электроприемниками котельной в зависимости от внешней температуры. В целом электропотребление слабо изменяется в зависимости от температуры. Четко прослеживается только два более-менее

равномерных участка: отопительный сезон и сезон летнего ГВС. В отопительный сезон потребление электроэнергии в месяц примерно в 30 раз больше, чем потребление электроэнергии в месяц в режиме летнего ГВС. В зимние месяцы котельная потребляет около 96 тыс. кВт*ч в месяц, летом – около 3 тыс. кВт*ч в месяц, что соответствует действительному потреблению электрической энергии котельной.

Моделирование показало эффективность частотных преобразователей для насосов всех девяти групп. Ожидаемая прибыль – в размере 500 тыс. руб. за 5 лет. Энергосберегающий потенциал от применения частотных преобразователей составит примерно ЭП≈11%.

Выводы

Разработанная модель позволяет прогнозировать потребление электрической энергии приемниками котельной в режиме дроссельного и частотного регулирования производительности насосов котельной. Задающим воздействием модели является среднемесячная температура внешней среды. Воздействие сформировано путем усреднения среднемесячной температуры в период с октября 2011 по октябрь 2016 г. Кривая среднемесячных температур аппроксимирована и полиномиально задана в модели. Реализовано случайное изменение среднемесячных температур в пределах [0,75...1,1] от профиля аппроксимированной кривой. Рабочие характеристики девяти групп насосов и их двигателей заданы полиномиально. Реализована температурная логика работы насосов и прочих потребителей электрической энергии котельной. Сформированы системы расчета энергосберегающего потенциала от применения частотных преобразователей, а также расчета срока окупаемости этих преобразователей.

Поставлено 50 опытов. Усреднение результатов показало энергосберегающий потенциал ЭП≈11%. Сроки окупаемости преобразователей частоты свидетельствуют об эффективности их использования. Ожидается, что частотное регулирование принесет чистую прибыль в размере 500 тыс. руб. за 5 лет с учетом окупаемости преобразователей частоты.

Литература

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: АСАДЕМА, 2006. С. 6.
2. Leonard W. Control of Electrical Drives. Berlin: Springer, 1996. S. 420.
3. Direct Torque Control of AC motor drives. M. Aaltonen, P. Tiitinen, J.Laku. S.Heikkilla // ABB Review – 1995. - № 3. – pp. 19- 24.
4. Buja G., Kazmierkowski M. P. Direct Torque Control of PWM Inverter-Fed AC Motors – A Survey: III Summer Seminar on Nordick Network for Multi Disciplinary Electric Drives. – 21 – 23 June 2003/ - Zegrze. – Poland. – pp. 1 – 19.
5. [Электронный ресурс] GRUNDFOS. Промышленное насосное оборудование. Режим доступа: http://www.pump-selection.ru/files/FilesGrundfos/books/8Industry_book_70012579_11061.pdf (дата обращения 30.11.2016).
6. Гумерова Р.Х., Черняховский В.А. Система очистки и рекуперации воды горячего водоснабжения // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 10–12 августа 2016 г. Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2016. С. 692-695.
7. Гумерова Р.Х., Черняховский В.А. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2016. №2. С. 25–31.
8. [Электронный ресурс] GISmeteo. Дневник погоды в Шумерле за Октябрь 2011 г. Режим доступа: <https://www.gismeteo.ru/diary/12891/2011/10/> (дата обращения 02.12.2016).
9. [Электронный ресурс] РИМОС. Производители насосов. GRUNDFOS. Режим доступа: <http://www.rimos.ru/grundfos> (дата обращения 02.12.2016).
10. [Электронный ресурс] ООО «Эстудо». Частотные преобразователи для асинхронных электродвигателей. Режим доступа: <http://частотники.рф/cenadanf.html> (дата обращения 02.12.2016).

11. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М. П. Белов, О.И. Зементов, А.Е. Козырук и др., под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 79.

Авторы публикации

Гумерова Рушана Хасяновна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ (КНИТУ–КАИ). E-mail: rgumerova@mail.ru.

Черняховский Владимир Александрович – магистрант кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ (КНИТУ–КАИ). E-mail: chernyahovsky@list.ru.

References

1. Sokolovskiy G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem [AC Electric Drives with Frequency Control] – Moscow: ACADEMA, 2006. - p. 6.
2. Leonard W. Control of Electrical Drives. – Berlin: Springer, 1996. – S. 420.
3. Direct Torque Control of AC motor drives. M. Aaltonen, P. Tiitinen, J. Laku. S. Heikkilä // ABB Review – 1995. - № 3. – pp. 19- 24.
4. Buja G., Kazmierkowski M. P. Direct Torque Control of PWM Inverter-Fed AC Motors – A Survey: III Summer Seminar on Nordick Network for Multi Disciplinary Electric Drives. – 21 – 23 June 2003/ - Zegrze. – Poland. – pp. 1 – 19.
5. [Electronic resource] GRUNDFOS. Promyshlennoe nasosnoe oborudovanie [GRUNDFOS. Industrial Solutions]. Access mode: http://www.pump-selection.ru/files/FilesGrundfos/books/8Industry_book_70012579_11061.pdf (date of the application 30.11/2016).
6. Gumerova R.Kh., Chernyakhovskiy V.A. Sistema ochistki i rekuperatsii vody goryachego vodosnabzheniya [System of Cleaning and Recovery Water of Cycle Hot Water Supply] // Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli: Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem, 10 – 12 avgusta 2016 g. - Kazan': Izd-vo Akademii nauk RT, 2016. - pp. 692-695.
7. Gumerova R.Kh., Chernyakhovskiy V.A. Zhurnal «Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva». 2016. - №2, Kazan'. pp. 25-31.
8. [Electronic resource] GISmeteo. Dnevnik pogody v Shumerle za Oktyabr' 2011 g. [The Journal of Weather in Shumerly City in October 2011 y.]. Access mode: <https://www.gismeteo.ru/diary/12891/2011/10/> (date of the application 02.12.2016).
9. [Electronic resource] RIMOS. Proizvoditeli nasosov. GRUNDFOS [RIMOS. Manufacturers of pumps. GRUNDFOS.]. Access mode: <http://www.rimos.ru/grundfos> (date of the application 02.12.2016).
10. [Electronic resource] ООО «Estudo». Chastotnye preobrazovateli dlya asinkhronnykh elektrodvigately [LLC «Estudo». Frequency Controllers for Induction Motors]. Access mode: <http://частотники.рф/cenadanf.html> (date of the application 02.12.2016).
11. Inzhiniring elektroprivodov i sistem avtomatizatsii : ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. Zavedeniy [Engineering of Electric Motor Drives and Automation Systems : Manual for Graduate Students] / М. П. Белов, О.И. Зементов, А.Е. Козырук и др., под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова. - М.: Издательский центр «Академия», 2006. – p. 79.

Authors of the publication

Gumerova Rushana Khasyanovna – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assist Prof of Electrical Equipment Department of Kazan National Research Technical University named A.N. Tupolev. E-mail: rgumerova@mail.ru.

© Р.Х. Гумерова, В.А. Черняховский

Chernyakhovskiy Vladimir Aleksandrovich – Student of the Master's Programme of Electrical Equipment
Department of Kazan National Research Technical University named A.N. Tupolev. E-mail:
chernyahovsky@list.ru.

Поступила в редакцию

19 декабря 2016г.