

## ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.311

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-55-61](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-55-61)Корнилов Г.П.<sup>1</sup>, Газизова О.В.<sup>1, 2</sup>, Абдулвелеев И.Р.<sup>1</sup>, Лыгин М.М.<sup>1</sup>, Бочкарев А.А.<sup>1</sup><sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАВОДСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Развитие собственной генерации электрической энергии является одной из особенностей металлургических производств. Благодаря использованию вторичных энергоресурсов – доменного и коксового газов – электроэнергия, производимая на заводских электростанциях, существенно дешевле покупной, получаемой из энергосистемы. Собственные электростанции крупнейших российских металлургических комбинатов – ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь» – покрывают в настоящее время 60-70 % общего потребления электроэнергии на каждом из этих предприятий. Статья посвящена исследованию резервов снижения потребления электроэнергии в системе собственных нужд одной из старейших электростанций ПАО «ММК». Рассматриваемая электростанция имеет в своем составе 8 энергетических котлов и 9 турбогенераторов мощностью более 200 МВт, она обеспечивает электроэнергией и теплом основные цеха предприятия, а также один из районов города. Транспортировка и подача основных компонентов технологического производства – воды, воздуха и топлива – осуществляется нерегулируемыми асинхронными электроприводами. Наиболее мощными и ответственными из них являются двигатели питательных насосов, которые осуществляют подачу воды к котлам с заданными параметрами – расходом и давлением. На сегодняшний день регулирование давления в системе производят ручным дросселированием за счет включения или отключения одного из насосов. Актуальной и практически значимой проблемой является обеспечение основных параметров питательных насосов за счет регулирования скорости электроприводов, что существенно повысит энергоэффективность станции. На математической модели проведено исследование режимов работы группы насосов с общим коллектором, где особое внимание уделено моделированию гидравлической части системы. В статье рассмотрены наиболее эффективные способы поддержания требуемого уровня давления. Согласно результатам комплексных исследований, проведенных на разработанной модели, авторами предложено каскадно-частотное управление регулируемых электроприводов питательных насосов. Внедрение такого решения обеспечит снижение потребления электроэнергии одного из насосов более чем на 20%.

**Ключевые слова:** электростанция, повышение эффективности, дросселирование, регулируемый привод, преобразователь частоты, питательные насосы, каскадно-частотное регулирование, заводское электроснабжение.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день известны два типа заводских электростанций: конденсационные (КЭС) и тепловые (ТЭС). Особенностью ТЭС является когенерация – возможность выработки тепловой и электрической энергии одновременно благодаря наличию в технологической схеме противодавленческой турбины с отбором пара на теплофикацию и собственные нужды.

Объектом исследования в данной статье является центральная электростанция (ЦЭС) крупного металлургического предприятия – ПАО «ММК», в которой большинство потребителей собственных нужд – насосов и вентиляторов – работают на генераторном напряжении [1-4]. На станции установлено 13 питательных насосов и 2 насоса пароохлаждения. Питательные электронасосы (ПЭН) обеспечивают подачу очищенной и подогретой воды в питательные магистрали котлов и подключены по всасыванию к двум общим коллекторам, собирающим воду из всех деаэраторных баков. По нагнетанию все насосы включены в общий напорный коллектор, секционированный задвижками.

Регулирование давления в коллекторе осуществляется двумя способами:

1. Использование одного из ПЭН в качестве насоса-регулятора. Обычно выбирают насос небольшой

мощности, который поддерживает давление в коллекторе на заданном уровне за счет включения и отключения.

## 2. Ручное дросселирование задвижкой.

Существенным резервом повышения энергетической эффективности ПЭН является замена ручного регулирования подачи воды на автоматическое за счет применения преобразователей частоты (ПЧ) [5-10].

Для решения поставленной задачи проведены экспериментальные исследования энергетических показателей ответственных приводов насосов с целью выявления необходимости и возможности установки частотных преобразователей, обеспечивающих существенное снижение потребления электроэнергии и приемлемые сроки окупаемости приобретаемого оборудования.

Отдельного внимания заслуживает разработка и исследование математической модели каскадно-частотного управления многодвигательных регулируемых электроприводов питательных насосов [11-13].

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПИТАТЕЛЬНОГО НАСОСА

Выбор питательных насосов в качестве объекта исследования обусловлен следующими причинами:

а) достаточно большая установленная мощность электродвигателей насосов может обеспечить существенную экономию электроэнергии при рациональном управлении их производительностью;

б) наличие двигателей различной мощности дает широкие возможности выбора их сочетаний для поддержания необходимых параметров – расхода и напора воды.

С учетом сказанного, безальтернативным, научно обоснованным и подтвержденным на практике способом управления подачей воды является применение ПЧ в электроприводах питательных насосов. Кроме того, переход на частотное регулирование позволяет существенно повысить энергоэффективность и улучшить экономические показатели электростанции.

В настоящее время приводы питательных насосов осуществляются от асинхронных двигателей мощностью 320-630 кВт и напряжением 3,15 кВ. Среднегодовая производительность питательной воды составляет 1100 т/ч и, как правило, колеблется от 730 до 1400 т/ч. Режим работы питательных насосов должен быть таким, чтобы в нагнетательном коллекторе поддерживалось номинальное давление 41 - 45 кгс/см<sup>2</sup>. Выход за пределы данного интервала не допускается ни при каких условиях. Поэтому работают 3 или 4 насоса, тогда как остальные насосы должны находиться в резерве [14, 15].

Для исследования стабилизации давления в коллекторе котла и анализа энергоэффективности системы собственных нужд ЦЭС разработана математическая модель, реализованная в программном комплексе Matlab Simulink и включающая в себя электромеханическую и гидравлическую части модели ПЭН и модель потребителя.

Ниже рассмотрены вопросы моделирования работы группы ПЭН при работе на общий водяной коллектор, из которого осуществляется подача воды в котлы [16]. Моделируемый комплекс насосов и потребителя упрощенно показан на **рис. 1**.

Для моделирования работы ПЭН используется следующее уравнение центробежного насоса:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{S_t}{l\rho} (P_i + P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} - R_{\text{r}\Sigma} Q_i^2), \quad (1)$$

где  $Q_i$  – расход жидкости насоса;  $S_t$  – площадь сечения выходного трубопровода насоса;  $l$  – длина трубопровода;  $\rho$  – плотность жидкости;  $P_i$  – давление, создаваемое насосом;  $P_{\text{вх}}$  – давление на входе трубопровода;  $P_{\text{вых}}$  – давление на выходе из отводящего трубопровода;  $R_{\text{r}\Sigma}$  – суммарное гидравлическое сопротивление участка трубопровода.

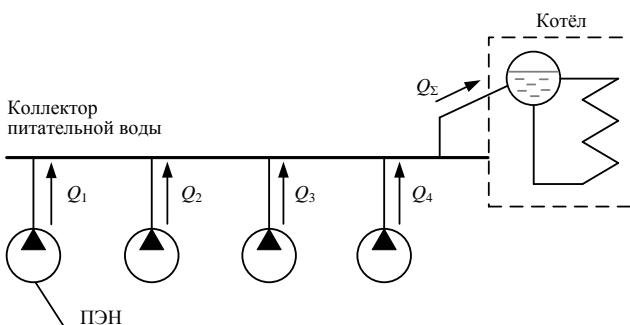


Рис. 1. Работа группы ПЭН на общий коллектор

Давление  $P_i$  в формуле (1), развиваемое насосом, зависит от скорости вращения следующим образом:

$$P_i = \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 k_{\text{n}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальная скорость вращения насоса;  $k_{\text{n}}$  – коэффициент пересчета скорости в давление, зависящий от конструкции насоса.

Таким образом, с учетом формул (1) и (2) можно записать выражения для развиваемой насосом гидравлической мощности и момента на валу:

$$P_{\text{г}} = P_i Q_i, \quad (3)$$

где  $P_{\text{г}}$  – гидравлическая мощность насоса.

$$M_i = \frac{P_i Q_i}{\eta \omega}, \quad (4)$$

где  $M_i$  – момент на валу насоса;  $\eta$  – КПД насоса.

Отметим также, что модель насоса дополнена подсистемой, определяющей изменение механического КПД насоса при изменении скорости вращения. Изменение КПД в зависимости от угловой скорости насоса определяется с помощью формулы Муди, преобразованной для насосов:

$$\eta = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^{0.36}}, \quad (5)$$

где  $\eta_{\text{ном}}$  – номинальный КПД насоса.

В модели насоса гидравлическое сопротивление разделено на две составляющие: непосредственно сопротивление насоса и сопротивление регулирующей задвижки. Обычно насосы имеют обратные клапаны, поэтому используется интегратор с нижним ограничением равным нулю. Таким образом, расход не может быть отрицательным.

Для моделирования потребителя можно использовать следующую зависимость:

$$P = R_{\text{тк}} Q_{\Sigma}^2 + P_{\text{c}}, \quad (6)$$

где  $Q_{\Sigma}$  – суммарный расход всех насосов в коллекторе;  $R_{\text{тк}}$  – приведенное гидравлическое сопротивление коллектора;  $P_{\text{c}}$  – статическое давление (напор).

При моделировании работы нескольких насосов на общий коллектор необходимо просуммировать их расходы, а сигнал давления, полученный на входе коллектора, подать на соответствующий вход насосов (рис. 2). В настоящее время привод насосов осуществляется от асинхронных двигателей с прямым пуском от сети, но в будущем планируется применение систем плавного пуска или частотных преобразователей. Для моделирования приводных двигателей использовались известные уравнения напряжений, токов и потокосцеплений асинхронного двигателя, приведенные к 2-фазной системе координат  $d$ - $q$ . Уравнение движения электропривода питательного насоса имеет вид

$$M_{\text{эм}} - M_i = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$

где  $M_{\text{эм}}$  – электромагнитный момент двигателя;  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции.

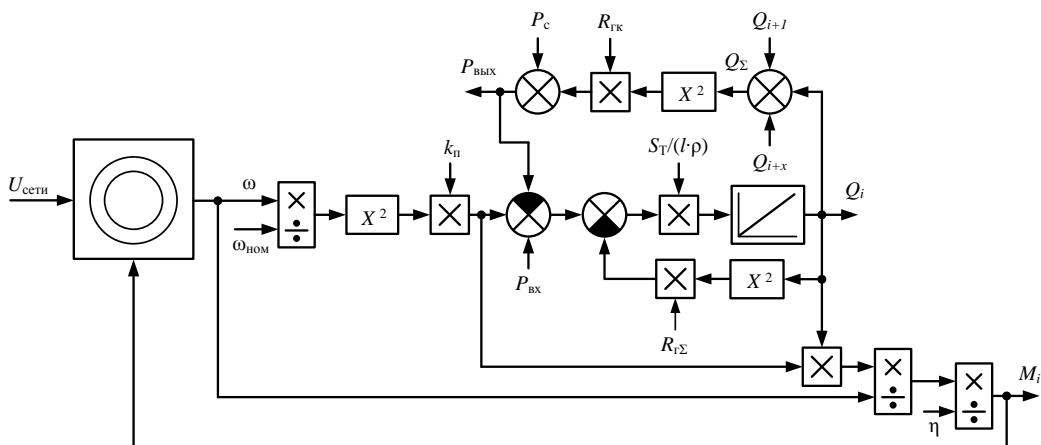


Рис. 2. Структурная схема модели ПЭН, работающего на общий коллектор от нерегулируемого асинхронного двигателя

Рассмотрим процесс определения параметров модели на примере одного из питательных насосов, параметры которого представлены в табл. 1. Исходя из паспортных данных насоса, по двум характерным точкам расхода (0 и 300 м<sup>3</sup>/ч) рассчитывается гидравлическое сопротивление насоса:

$$R_t = \frac{P_0 - P_i}{Q^2}, \quad (8)$$

где  $P_0 = 5148$  кПа – давление при нулевом расходе.

Характеристика  $P = f(Q)$  для одного насоса, полученная по представленным в табл. 1 параметрам, показана на рис. 3 (кривая 1). Также на рисунке приведены характеристики для системы с 2, 3 и 4-мя насосами соответственно, работающих на общего потребителя при разных расходах потребляемой воды. Характерной особенностью рассматриваемого потребителя является наличие противодавления из-за давления в котлах и необходимости подъема воды на высоту.

На рис. 3 показаны диапазоны возможной регулировки давления при изменении расхода. Из-за наличия противодавления и сочетания параметров потребителя и насосов диапазон регулирования давления находится в пределах 4-4,8 МПа. Диапазон регулирования при использовании ПЧ находится приблизительно в этих же пределах и будет уточнен далее на динамической модели.

Значение гидравлического сопротивления коллектора  $R_{тк}$  может меняться в процессе работы. Определим значение сопротивления, относительно которого будет возможно изменение режима работы системы при моделировании. Из данных рабочего режима станции, полученных опытным путем, рассчитаем значение  $R_{тк}$  согласно (6). Примем в качестве расчетного режима ситуацию, когда три насоса работают с расходом 300 м<sup>3</sup>/ч и один – 100 м<sup>3</sup>/ч (точка «A» на рис. 3). В результате 4 насоса работают с суммарным расходом 1000 м<sup>3</sup>/ч (или 0,278 м<sup>3</sup>/с), при этом в коллекторе создается давление 4,511 МПа. Отсюда гидравлическое сопротивление коллектора составит

$$R_{тк} = \frac{P - P_c}{Q_{\Sigma}^2} = \frac{(4,511 - 4) \cdot 10^6}{0,278^2} = 6612 \frac{\text{кПа} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^6}. \quad (9)$$

Таблица 1  
Параметры питательного насоса

Параметр	Значение
Номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$ , кВт	630
Номинальная скорость $n_{\text{ном}}$ , об/мин	1480
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ , кВ	3,15
Номинальный расход $Q_{\text{ном}}$ , м <sup>3</sup> /ч	300
Номинальный напор $H_{\text{ном}}$ , м вод. ст.	480
Номинальное давление $P_{i,\text{ном}}$ , кПа	4707
Коэффициент $k_{\text{н}}$ , кПа	5148
Гидравлическое сопротивление насоса $R_t$ , кПа·с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup>	63549

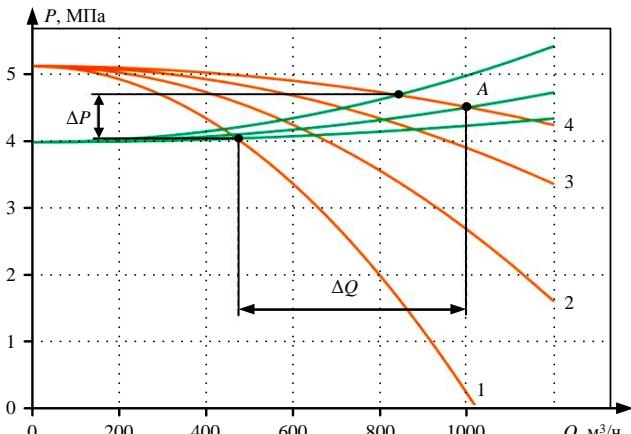


Рис. 3. Характеристика  $P = f(Q)$  системы из нескольких насосов и потребителя при разном расходе

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДНО-ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ

В целях повышения энергоэффективности станции и снижения потребления электроэнергии предложено использование каскадно-частотного управления многодвигательных регулируемых электроприводов питательных насосов. При питании асинхронного двигателя от ПЧ с системой регулирования скорости свойства объекта управления для внешнего наблюдателя существенно линеаризуются. Для этих целей вполне допустимо внутренний контур регулирования момента представить инерционным звеном, как это показано на рис. 4.

В предлагаемой системе с ПЧ задание на скорость формирует регулятор давления. Концепция построения такой системы регулирования показана на рис. 5.

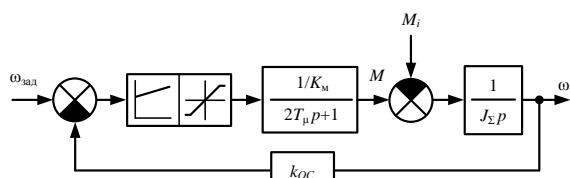


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования момента при использовании ПЧ с векторным управлением

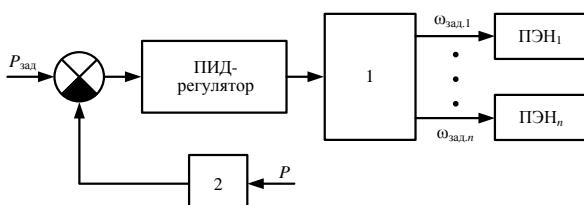


Рис. 5. Принцип построения регулятора давления при частотном управлении ПЭН:  
1 – блок распределения заданий скорости;  
2 – блок масштабирования и фильтрации

Блок распределения заданий скорости может осуществлять функцию выравнивания загрузки насосных агрегатов по току или производить отключение «лишнего» насоса (в таком случае необходимо предусмотреть возможность адаптации системы, то есть автоматическую подстройку коэффициентов регулятора).

Рассмотрим вариант каскадно-частотного управления системой из четырех насосов, в которой три двигателя работают от сети, а скорость четвертого регулируется преобразователем частоты. Задание скорости для привода с ПЧ формирует ПИД(или ПИ)-регулятор в функции стабилизации давления. Результаты моделирования пуска и работы системы поддержания давления показаны на рис. 6.

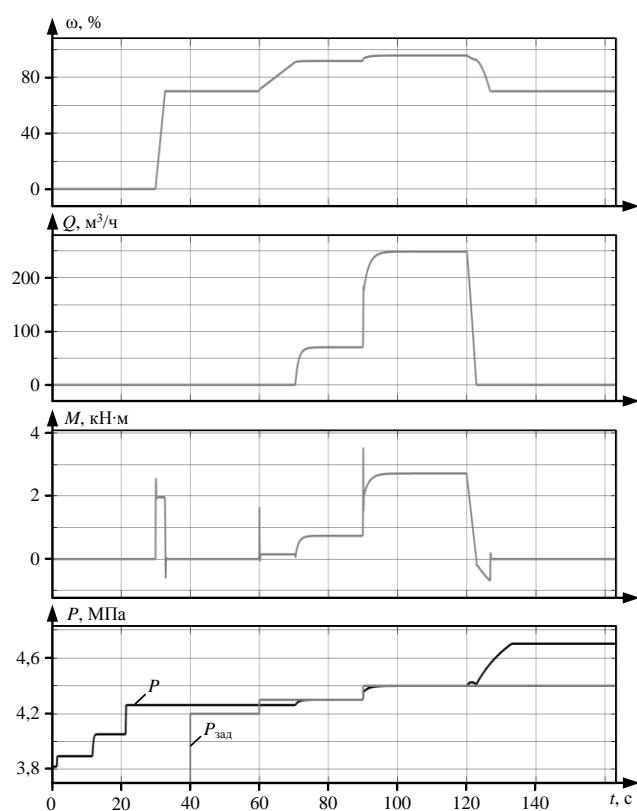


Рис. 6. Результаты моделирования каскадно-частотного управления питательных насосов с регулируемым приводом

В момент времени  $t=40$  с происходит запуск ПЧ и включение регулятора. Далее для демонстрации диапазона регулирования при  $t=60$  с и  $t=90$  с ступенчато изменяется заданное давление. В момент времени  $t=120$  с меняются параметры потребителя воды (эквивалентное гидравлическое сопротивление общего коллектора). Видно, что при учете противодавления, нижняя граница скорости двигателя с ПЧ при регулировании составляет примерно 90-93% от номинальной. Требуемый уровень стабилизации давления в системе ЦЭС обеспечивается в полной мере.

#### РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Подача питательной воды в течение года меняется в диапазоне 730-1400 т/ч. В работе всегда находятся три-четыре насоса, а еще восемь – в резерве. Регулирование производительности осуществляется дросселированием на насосе ПЭН-3 или включением и отключением насоса ПЭН-6 меньшей мощности.

В табл. 2 показаны результаты расчёта потребляемой насосом ПЭН-3 мощности при регулировании производительности дросселированием. Информация о напоре и расходе взята из характеристики насоса. В расчётах удельный вес воды  $\gamma$  принят равным 1, а КПД насоса  $\eta = 0,7$ .

Питательные насосы подают воду из всасывающего коллектора в нагнетательный. Перепад высоты, который необходимо для этого преодолеть, составляет 4 м. Для уверенного преодоления горизонтального участка перепад высот принимается равным 5 м.

Для расчётов режимов работы, обеспечивающих различную производительность при статическом напоре 5 м, была взята из справочной литературы естественная характеристика насоса и построено семейство расчётных рабочих характеристик. В табл. 3 показаны результаты расчёта требуемой мощности при регулировании производительности насоса изменением частоты вращения, а на рис. 7 приведены характеристики насоса при номинальной и пониженной частоте вращения. Для расчёта использованы следующие соотношения:

$$\frac{Q_{\text{ном}}}{Q} = \frac{n_{\text{ном}}}{n}; \quad (10)$$

$$\frac{H_{\text{ном}}}{H} = \left( \frac{n_{\text{ном}}}{n} \right)^2; \quad (11)$$

$$\frac{P_{\text{ном}}}{P} = \left( \frac{n_{\text{ном}}}{n} \right)^3. \quad (12)$$

Таблица 2  
Потребляемая насосом мощность при дросселировании

Величина открытия задвижки, %	100	85	70	55	40	25
Поток $Q$ , м³/ч	300	255	210	165	120	75
Напор $H$ , м вод. ст.	480	503	530	555	580	600
Скорость вращения $n$ , об/мин					1477,5	
Мощность $P$ , кВт	560	499	433	356	270	175

Таблица 3

## Потребляемая насосом мощность при изменении частоты вращения

Рабочая частота ПЧ $f$ , Гц	50	37,5	35,4	30
Поток $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	300	255	212	180
Напор $H$ , м вод. ст.	480	270	240	173
Скорость вращения $n$ , об/мин	1478	1108	1046	887
Мощность с ПЧ $P$ , кВт	560	236	200	121
Мощность без ПЧ $P$ , кВт	560	506	498	485
Экономия мощности $\Delta P$ , кВт	0	270	298	364

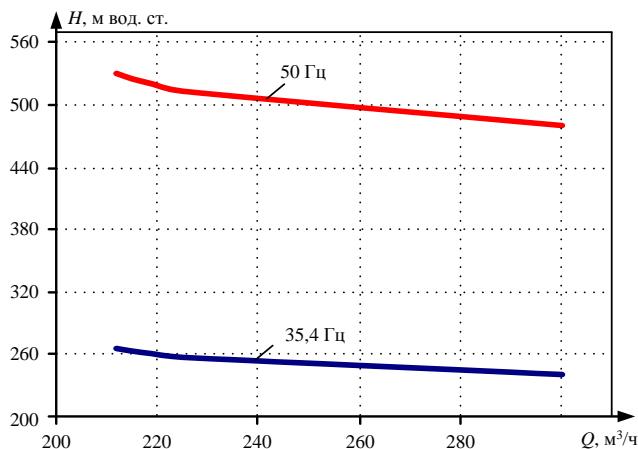


Рис. 7. Характеристики насоса при номинальной и пониженной частоте вращения

Анализ показал, что среднее потребление питательной воды котлами в течение года составило примерно 1100 м<sup>3</sup>/ч, что соответствует производительности трёх ПЭН в 300 м<sup>3</sup>/ч и одного насоса в 200 м<sup>3</sup>/ч. Если двигатель этого насоса работает от ПЧ, то при заданной производительности потребляемая мощность существенно снижается по сравнению с дросселированием.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований проблемы повышения энергоэффективности центральной электростанции выявлены основные факторы, оказывающие влияние на стабилизацию уровня давления в общем выходном коллекторе и экономию электроэнергии при работе электроприводов питательных насосов. Подробно изложены основные принципы математического моделирования подобных объектов и представлены результаты исследований, полученных на разработанной модели. В работе авторами предложена система каскадно-частотного управления электроприводами насосов в условиях существующей схемы, при которой часть двигателей работает от сети, а один – с регулированием скорости посредством ПЧ. Реализация предлагаемого технического решения в условиях действующего производства позволит достичь следующих результатов:

1. Стабилизация уровня давления в общем выходном коллекторе в соответствии с технологическими требованиями.

2. Высокая надежность и стабильность поддержания заданного технологического режима для ответственных электроприемников собственных нужд про-

мышленного предприятия при различных возмущающих воздействиях.

3. Существенное снижение потребляемой мощности двигателей питательных насосов за счет использования частотного регулирования по сравнению с дросселированием.

*Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых учёных–кандидатов наук СП-1841.2022.1.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoang A.T., Nguyen T.V., Nguyen B.T. The Novel Design of Feed-water Control System for Thermal Power Plant Using Super-critical Start-up Motor-Boiler Feed-water Pump // PES/IAS PowerAfrica. IEEE, 2020. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219903
2. Zhiyong H., Renmu H., Yanhui. X. Effect of Steam Pressure Fluctuation in Turbine Steam Pipe on Stability of Power System // 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2008. Pp. 1127-1131. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523576
3. Состояние и перспективы развития систем электроснабжения металлургических предприятий с собственными электростанциями / Г.П. Корнилов, А.В. Варганова, А.Н. Шеметов, О.В. Газизова, Р.Р. Храмшин, Ю.Н. Кондрашова, И.Р. Абдулвелеев, А.А. Бочкарев // Изв. вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. №4-5. С. 79-89. doi: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-79-89
4. Особенности электроснабжения металлургического комбината и возможные перспективы его развития / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, О.В. Газизова, Л.А. Копцев // Металлург. 2021. № 7. С. 81-89.
5. Энергосбережение в теплотехническом хозяйстве города средствами регулируемого электропривода: монография / Крылов Ю.А., Медведев В.Н., Карандаев А.С., Корнилов Г.П. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 202 с.
6. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, О.И. Карандаева, А.Р. Губайдуллин, Р.Р. Галлямов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 79-84.
7. Способы повышения надежности ответственных электроприводов заводских электростанций металлургических производств / К.Э. Одинцов, М.Ю. Петушкин, Е.Ф. Иванов, А.А. Бочкарев, М.М. Лыгин // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 28-32. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32
8. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulveleev I.R. Increasing Stability of Electric Drives of Rolling Mills with Active Front Ends at Voltage Sag // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945.
9. Advanced Electric Drive Control System of Continuous Hot-Dip Galvanizing Line / G.P. Kornilov, I.R. Abdulveleev, T.R. Khramshin, V.V. Shokhin // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111905
10. Study of the Compensating Ability of Synchronous Motors in the Power Supply System of a Metallurgical Enterprise / G.P. Kornilov, I.R. Abdulveleev, T.R. Khramshin, A.A. Nikolaev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. Pp. 1-7. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112039
11. Ciontu M., Bratu C. Program for Efficiency Analizing for Variable Speed Drive of Pumps // 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). IEEE,

2010. Pp. 298-302. doi: 10.1109/ISEEE.2010.5628496
12. Rizov P., Gueorgiev V. Influence of the Excitation Regime of Turbo-generators on the Own Needs Supply Stable Operation // 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). IEEE, 2017. Pp. 267-270. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955446
13. Ahmed A., Moharam B., Rashad E. Power Saving of Multi Pump-Motor Systems Using Variable Speed Drives // 20th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2018. Pp. 839-844. doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635157
14. Analysis of Causes of Boiler Accidents in Power Plant and Accident Handling Based on Mathematical Statistics / G. Lian, Y. Niu, X. Zhang, Y. Lu, H. Li // International Conference on Engineering Simulation and Intelligent Control (ESAIC). IEEE, 2018. Pp. 17-20. doi: 10.1109/ESAIC.2018.00012
15. The System for Stabilizing Voltage for Essential Consumers in Industrial Grids / G.P. Kornilov, I.R. Abdulveleev, R.R. Khramshin, O.V. Gazizova // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2021. Pp. 209-213. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446443
16. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications // European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005. Pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434

Поступила в редакцию 08 марта 2022 г.

**INFORMATION IN ENGLISH****IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL POWER PLANTS AT METALLURGICAL ENTERPRISES**

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, korn\_mgn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Electrical Power Engineering Department, Tobolsk Industrial Institute, Tobolsk Branch of the Industrial University of Tyumen, Tobolsk, Russia, logan\_b\_7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Ildar R. Abdulveleev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, leggyild@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>

Maxim M. Lygin

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, eligin@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>

Aleksey A. Bochkarev

Undergraduate Student, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, analogsynth@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8834-2384>

The development of on-site electrical energy generation is a distinctive feature at metallurgical enterprises. Thanks to the using of secondary energy resources - blast furnace and coke oven gases, electricity produced at industrial power plants is significantly cheaper than the electricity received from the power system. On-site power plants of the largest Russian metallurgical plants, such as PJSC MMK, PJSC NLMK, PJSC Severstal, currently cover 60-70% of the total electricity consumption at these enterprises. The article is devoted to the electric energy saving reserves study in the in-house needs system at one of the oldest power plants, at PJSC MMK. This power plant includes 8 power boilers and 9 turbogenerators with a capacity of more than 200 MW; it provides electricity and heat to the main workshops of the enterprise, as well as to one city district. Transportation and supply of the main components for the technological process, such as water, air and fuel, is carried out by unregulated asynchronous electric drives. The most powerful and critical ones are the electric drives of the feed pumps, which supply water to the boilers with the specified flow rate and pressure. To date, the pressure in the system is regulated by manual throttling by turning on or off one of the pumps. An urgent and practically significant problem is to ensure the main parameters of feed

pumps by controlling the electric drives speed, which will significantly increase the station energy efficiency. Using a mathematical model, a study was carried out to investigate the operating modes of a pump group with a common manifold, where special attention is paid to modeling the hydraulic part of the system. The article considers the most effective ways to maintain the required pressure level. According to the results of comprehensive studies carried out on the developed model, the authors proposed a cascade-frequency control of adjustable electric drives of feed pumps. The implementation of such a solution will reduce the pump electricity consumption by more than 20%.

**Keywords:** power plant, efficiency improvement, throttling, adjustable drive, frequency converter, feed pumps, cascade frequency control, factory power supply.

**REFERENCES**

1. Hoang A.T., Nguyen T.V., Nguyen B.T. The Novel Design of Feed-water Control System for Thermal Power Plant Using Super-critical Start-up Motor-Boiler Feed-water Pump. PES/IAS PowerAfrica. IEEE, 2020, pp. 1-5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219903

2. Zhiyong H., Renmu H., Yanhui. X. Effect of Steam Pressure Fluctuation in Turbine Steam Pipe on Stability of Power System. 3<sup>rd</sup> International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2008, pp. 1127-1131. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523576
3. Kornilov G.P., Varganova A.V., Shemetov A.N., Gazizova O.V., Khramshin R.R., Kondrashova Yu.N., Abdulveleev I.R., Bochkarev A.A. The State and Development Prospects of Power Supply Systems at Metallurgical Enterprises with On-Site Power Plants. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2021, vol. 64, no. 4-5, pp. 79-89. doi: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-79-89 (In Russian)
4. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Gazizova O.V., Koptsev L.A. Power Supply Features of Metallurgical Iron-and-Steel Works and Possible Development Prospects. *Metallurg* [Metallurgist], 2021, no. 7, pp. 81-89. (In Russian)
5. Krylov Yu.A., Medvedev V.N., Karandaev A.S., Kornilov G.P. *Energosberezenie v teplotekhnicheskem khozyaystve goroda sredstvami reguliruemogo elektroprivoda* [Energy Saving in the Municipal Heat Engineering Economy by Means of a Regulated Electric Drive]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2012. 202 p. (In Russian)
6. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Karandaeva O.I., Gubaidullin A.R., Gallyamov R.R. Ways to Increase the Frequency-Controlled Electric Drive Stability in Case of Power Supply Disturbances. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Bulletin of NMSTU], 2011, no. 4, pp. 79-84. (In Russian)
7. Odintsov K.E., Petushkov M.Yu., Ivanov E.F., Bochkarev A.A., Lygin M.M. Improving the Critical Electric Drives Reliability at Industrial Power Plants of Metallurgical Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 28-32. doi: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-28-329 (In Russian)
8. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulveleev I.R. Increasing Stability of Electric Drives of Rolling Mills with Active Front Ends at Voltage Sag. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS 2019). IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
9. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Shokhin V.V. Advanced Electric Drive Control System of Continuous Hot-Dip Galvanizing Line. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICI-EAM 2020). IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111905
10. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khramshin T.R., Nikolaev A.A. Study of the Compensating Ability of Synchronous Motors in the Power Supply System of a Metallurgical Enterprise. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2020). IEEE, 2020, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112039
11. Ciontu M., Bratu C. Program for Efficiency Analyzing for Variable Speed Drive of Pumps. 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE 2010). IEEE, 2010, pp. 298-302. doi: 10.1109/ISEEE.2010.5628496
12. Rizov P., Gueorgiev V. Influence of the Excitation Regime of Turbo-generators on the Own Needs Supply Stable Operation. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA 2017). IEEE, 2017, pp. 267-270. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955446.
13. Ahmed A., Moharam B., Rashad E. Power Saving of Multi Pump-Motor Systems Using Variable Speed Drives. 20<sup>th</sup> International Middle East Power Systems Conference (MEPCON 2018). IEEE, 2018, pp. 839-844. doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635157
14. Lian G., Niu Y., Zhang X., Lu Y., Li H. Analysis of Causes of Boiler Accidents in Power Plant and Accident Handling Based on Mathematical Statistics. International Conference on Engineering Simulation and Intelligent Control (ESAIC 2018). IEEE, 2018, pp. 17-20. doi: 10.1109/ESAIC.2018.00012
15. Kornilov G.P., Abdulveleev I.R., Khramshin R.R., Gazizova O.V. The System for Stabilizing Voltage for Essential Consumers in Industrial Grids. 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2021). IEEE, 2021, pp. 209-213. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446443
16. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications. 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434

Повышение энергетической эффективности заводских электростанций metallurgicheskikh предпринятий / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, И.Р. Абдулвелеев, М.М. Лыгин, А.А. Бочкарев // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 55-61. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-55-61](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-55-61)

Kornilov G.P., Gazizova O.V., Abdulveleev I.R., Lygin M.M., Bochkarev A.A. Improving the Energy Efficiency of Industrial Power Plants at Metallurgical Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 55-61. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-55-61](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-55-61)