



УДК 621.316.11:621.67

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

В.Г. Лысяк^а, Ю.Л. Шелех^а, М.Б. Сабат^а^а Национальный университет «Львівська політехніка», Львов, 79013, Украина

Адрес для переписки: vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua

Информация о статье

Поступила в редакцию 20.04.17, принята к печати 05.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Лысяк В.Г., Шелех Ю.Л., Сабат М.Б. Математическая модель электротехнического комплекса системы энергоснабжения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 733–743. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743

Аннотация

Исследованы физические процессы, происходящие в электротехнических комплексах с турбомеханизмами и трубопроводами. Определена стратегия усовершенствования методов и средств анализа режимов работы электротехнических комплексов с управляемыми насосными станциями для повышения энергоэффективности их функционирования. Предложена классификация подсистем таких комплексов, проведен поэлементный и общий анализ современного состояния их моделирования. Показано, что, несмотря на большое количество трудов, посвященных этой тематике, на сегодняшний день недостаточно разработан системный подход к математическому моделированию процессов, происходящих в таких комплексах. В связи с наибольшим потенциалом энергосбережения мощных комплексов именно в установившихся режимах обоснована необходимость создания эффективного средства их анализа. На основе формализованного подхода разработана математическая модель обобщенного электротехнического комплекса системы энергоснабжения насосной станции. Модель прошла успешную апробацию при расчете стационарных режимов систем энергоснабжения нефтеперекачивающей станции и канализационной станции водоотведения. Предложенную модель целесообразно использовать для анализа режимов как действующих, так и проектируемых объектов, а также для создания систем автоматического управления подобными объектами.

Ключевые слова

комплекс, станция, насос, центробежный, трубопровод, гидравлическая, аналогия, сеть, система, энергоснабжение, привод, двигатель, управление, математическая модель

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROTECHNICAL COMPLEX FOR POWER SUPPLY SYSTEM

V.H. Lysiak^а, Yu.L. Shelekh^а, M.B. Sabat^а^а Lviv Polytechnic National University, Lviv, 79013, Ukraine

Corresponding author: vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua

Article info

Received 20.04.17, accepted 05.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743

Article in Russian

For citation: Lysiak V.H., Shelekh Yu.L., Sabat M.B. Mathematical model of electrotechnical complex for power supply system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 733–743 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743

Abstract

We study the physical processes occurring in electrotechnical complexes with turbo mechanisms and pipelines. The strategy for improvement of the methods and means is defined for analyzing the operating modes of electrotechnical complexes with controlled pumping stations for energy efficiency raising of their operation. Subsystem classification of such complexes is proposed; an element-wise and general analysis of the current state of their modeling is carried out. It is shown that, in spite of a large number of works devoted to this topic, a systematic approach to mathematical modeling of processes occurring in such complexes has not been developed to date. In connection with the greatest potential for energy saving of powerful complexes, the necessity of creating an effective means of their analysis is justified, particularly, in the steady-state regimes. Based on the formalized approach, a mathematical model of the generalized electrotechnical complex of the power supply system of a pumping station has been developed. The model was successfully tested in the calculation of stationary modes of

power supply systems for oil pumping station and a sewerage station. It is advisable to use the proposed model for analyzing the modes of both operating and projected objects, as well as for creating automatic control systems for such objects.

Keywords

complex, station, pump, centrifugal, pipeline, hydraulic analogy grid, system, power supply, drive, engine, control, mathematical model

Введение

Мощные электротехнические комплексы (ЭТК) с турбомеханизмами являются жизненно важными, а в ряде случаев – и стратегическими объектами со значительным энергопотреблением. Исследование физических процессов, происходящих в таких комплексах, является актуальной научной проблемой, поскольку проведение натурных экспериментов над ними либо слишком затратно, либо вообще невозможно в связи с недопустимостью отклонений в их работе. Зачастую единственно доступным оказывается теоретическое исследование таких объектов методом математического моделирования.

Системы энергоснабжения (СЭ) насосных станций (НС) магистральных нефте- и водопроводов являются существенными потребителями электрической энергии. Электропривод центробежных насосов (ЦН) потребляет около 20–25% всей вырабатываемой электроэнергии. Только в результате неоптимальных режимов ЦН с избыточными статическими и динамическими напорами потери энергии составляют 5–15% (в некоторых случаях 25–50%). Сбережение 1 кВт·ч электроэнергии приводит к экономии около 5 кВт·ч энергии первичных ресурсов. Эффективное решение задач энергосбережения НС возможно только путем экономии топлива и электроэнергии. Необходимым условием является учет при этом ряда других факторов (например, возможность рекуперации энергии, увеличение межремонтных интервалов, сокращение расходов на ремонт, эксплуатацию и природоохранные мероприятия и т.д.). Кроме этого, необходимо систематизировать и учитывать предыдущий опыт внедрения энергосберегающих мероприятий на НС. При решении этих задач необходимо также учитывать эксплуатационные изменения рабочих характеристик ЦН [1]. Таким образом, многоэтапность осуществления анализа режимов работы ЭТК, а также необходимость учета при этом ряда факторов требуют совершенствования методов такого анализа путем создания обобщенных математических моделей (ММ) с применением общих подходов.

НС вместе с ее СЭ является сложным ЭТК и состоит из энергетически взаимосвязанных подсистем различной физической природы – электромагнитных, механических и гидравлических с высокой стоимостью оборудования (в дальнейшем ЭТК «СЭ–НС» будем сокращенно называть «ЭТК»). Они характеризуются значительной мощностью единичных агрегатов и относительной удаленностью агрегатов от источников питания, что вызывает как взаимное влияние отдельных агрегатов друг на друга, так и взаимное влияние НС и ее СЭ в целом.

Перечисленные особенности таких объектов с учетом их стратегического значения и ростом стоимости энергоносителей позволяют сделать вывод о необходимости комплексного научного подхода к их исследованию.

Современное состояние моделирования электротехнических комплексов с насосными станциями

Рассматривая НС с электроприводными ЦН в неразрывной связи с системой энергоснабжения как единый ЭТК, условно разделим его на такие подсистемы:

- гидравлическую (трубопровод, гидросеть) – конечный потребитель энергии;
- электрогидравлическую (электроприводные ЦН);
- электрическую (систему энергоснабжения), которая питает электроприводные ЦН, между которыми существуют связи (не путать с понятием «связи» в механике):
- гидравлические – между электроприводными ЦН и между ними и гидросетью;
- электрические – между электроприводными ЦН и между ними и СЭ;
- информационные – в виде системы управления электрической, гидравлической и электрогидравлической подсистемами.

Именно такое разделение на подсистемы положено в основу дальнейшего анализа.

В электроприводной системе водоснабжения [2] трубопровод представлен как элемент сети с распределенными параметрами с учетом сил жидкостного трения. В [3] средствами среды Simulink с использованием готовых библиотек смоделирована система водоснабжения с частотно управляемыми ЦН во время забора воды из плотины. Напорная характеристика ЦН аппроксимирована полиномом. Подробно смоделированы гидравлическая сеть (ГС) с учетом влияния коэффициентов трения, диаметра труб, их длины и т.д., а также безнапорные резервуары воды, в которые она поступает и из которых отбирается. ММ тепловых сетей [4] характеризуется высокой степенью детализации системы трубопроводов. Предложенная в [5] ММ погружного электроприводного ЦН разделена на четыре отдельных модуля. Однако зависимость напора от расхода представлена одним уравнением – в виде квадратичного полинома, а в состав уравнений модели входят безразмерные коэффициенты, лишённые физического смысла. В работе

[6] ЦН представлен в виде напора и коэффициента полезного действия (КПД), выраженных квадратичными полиномами расхода с коэффициентами, которые учитывают влияние скорости вращения рабочего колеса и условное уменьшение его диаметра за счет наличия лопастей. Модель трубопровода получена из эмпирической формулы Дарси–Вейсбаха; ее окончательный вид зависит от параметров трубопровода и состава суспензии. ММ [7] произвольного насоса автор получает как совокупность соединенных между собой (на основании общей теории цепей и в соответствии с пространственным строением ЦН) ММ отдельных его элементов. Применен принцип электрогидродинамических аналогий (ЭГДА). Этот же метод успешно применен в [8] для получения математической модели ЦН и вычисления его параметров по геометрическим размерам элементов. Имитационные модели одноступенчатого [9] и многоступенчатого [10] ЦН сформированы методами вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD).

Общей чертой рассмотренных работ является максимально упрощенное представление электрической подсистемы без учета СЭ. Внимание сосредоточено на моделировании элементов гидравлической подсистемы. С другой стороны, существует ряд ММ, в которых детализированно моделируются элементы электрической подсистемы.

В работе [11] синтезирована модель электроприводных ЦН вместе с нефтяной скважиной в виде уравнений регрессии. Передаточные функции использованы автором [12] для моделирования электроприводных ЦН с системой автоматического управления (САУ) движением жидкости. В [13] в среде MATLAB построена ММ асинхронного привода ЦН. Упрощенную математическую модель ЦН с вентильным индукторным двигателем предложили в [14]. В этих работах насосные нагрузки представлены обычной механической характеристикой. В [15] разработана схема векторно-управляемого электропривода ЦН. Насос представлен в виде механического момента сопротивления, аппроксимированного квадратичной параболой. Механическая характеристика ЦН аппроксимирована квадратичной параболой. В [16] мощность и напор электроприводных турбомеханизмов аппроксимированы полиномами расхода и относительного значения частоты с постоянными безразмерными коэффициентами. В [9, 15, 17, 18] разработаны и исследованы ММ частотно управляемого электропривода ЦН. Насосная нагрузка смоделирована вентиляторной механической характеристикой с безразмерным коэффициентом. ММ частотно управляемой электрогидравлической системой с учетом водопроводной сети разработана в [19]. Трубопровод и ЦН представлены в упрощенном виде; детальное математическое описание использовано только для асинхронных двигателей (АД).

Структурные схемы САУ единичными электроприводными ЦН или их группами для различных схем водоснабжения, количественные оценки энерго-ресурсосбережения путем минимизации потерь электроэнергии и воды с использованием оценщиков КПД, напора и расхода ЦН, алгоритмы управления приведены в [20–24]. Синтезу и анализу нейронных сетей для управления ЦН посвящены работы [25–27]. Общим для этих работ является то, что турбомеханизмы смоделированы или передаточными функциями, или на основании простейших схем замещения с использованием номинального КПД.

Результаты экспериментальных исследований электроприводных турбоагрегатов путем модального анализа [28], измерения электрических и механических координат режима при кавитации ЦН [29], спектральный анализ этих координат для выявления других неисправностей [30] являются базой для построения специализированных ММ.

Алгоритм управления группой электроприводных ЦН с параллельным соединением гидротрактов разработан в [31]. ЦН представлены напорными вентиляторными характеристиками. В [32] предложена модель электроприводных ЦН, с помощью которой локализация повреждений осуществляется на основании только электрических координат режима. Несмотря на эффективность в достижении результата, модель является эмпирической и не отображает внутреннего строения агрегата. Работы [5, 33] посвящены выявлению и локализации неисправностей в многоступенчатых электроприводных ЦН. Уравнения математической модели АД сформированы в $d-q$ координатах без учета нелинейности главной магнитной цепи и потерь электроэнергии в стальном сердечнике. Модель ЦН представлена в виде вентиляторной и механической напорной характеристик, которые зависят от ее внутренних конструктивных размеров.

В большинстве рассмотренных работ внимание сосредоточено на моделировании элементов электропривода или (и) систем управления. Лишь в отдельных из них предложены модели, в которых сбалансированной степенью детализации одновременно представлены и электропривод, и гидравлическая подсистема.

Наконец, охарактеризуем существующие на сегодня средства анализа режимов работы СЭ с НС как единых ЭТК. В [34] приведена имитационная модель НС, полученная на основании методов CFD, в [35] построены имитационные модели НС. Турбомеханизмы смоделированы в виде аппроксимационных выражений, полученных из семейства их механических и напорных характеристик для различных угловых скоростей вращения.

Кроме перечисленных работ, существует ряд готовых прикладных программных комплексов, позволяющих учитывать взаимное влияние гидравлических и энергетических параметров (например, MIKE

NET фирмы DHI WATER ENVIRONMENT для расчета системы водоснабжения). В основу их реализации положены методы имитационного, феноменологического, стохастического или регрессионного моделирования. Они связывают между собой параметры и координаты режима гидравлической подсистемы (геометрические размеры, расходы, давления) с основными энергетическими координатами режима СЭ (стоимость электроэнергии, потребляемая мощность). Такие программные продукты имеют прежде всего прикладное значение.

Подведем итоги. Рассмотренные нами работы, посвященные моделированию электротехнических комплексов насосных станций как взаимосвязанных между собой подсистем различной физической природы, можно разделить на следующие группы:

1. работы, в которых внимание сосредоточено на моделировании элементов гидравлической подсистемы с упрощенным представлением электропривода без учета СЭ;
2. работы, в которых внимание сосредоточено на моделировании электроприводных ЦН с упрощенным представлением гидравлической подсистемы без учета СЭ;
3. работы, в которых внимание сосредоточено на разработке САУ электроприводом с упрощенным представлением ГС (нередко – и электропривода) без учета СЭ;
4. экспериментальные и теоретические работы для выявления неисправностей;
5. значительно меньшее количество работ посвящено моделированию систем энергоснабжения НС с учетом гидравлических и электрических связей между ЦН, ГС, САУ, взаимного их влияния.

Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии ММ установившихся режимов ЭТК, которая позволяла бы со сбалансированной степенью детализации учитывать взаимное влияние гидравлических и электромагнитных параметров, и координат режима.

Обобщенная математическая модель электротехнического комплекса «система энергоснабжения – насосная станция»

Анализ экспериментальных записей координат режимов мощных НС показал, что расходы ЦН очень медленно изменяются во времени (за исключением пуска, остановки оборудования и аварийных процессов). Например, по данным суточного графика потребления воды в водопроводной сети [19] максимальная скорость нарастания или убывания потребления не превышает 0,1% в секунду. Это обоснованно позволяет выделить такие длительные режимы НС и их СЭ и рассматривать их как квазистационарные, анализ которых требует создания соответствующих средств. Именно в этих режимах происходят основная доля энергопотребления и значительные потери энергии, и именно в них энергосбережение дает наиболее ощутимый эффект.

С учетом изложенного авторами предложена обобщенная ММ установившихся режимов ЭТК, из которой можно получить модель ЭТК произвольной конфигурации. При моделировании гидравлической подсистемы использован метод ЭГДА. Уравнения обобщенной ММ формируются из уравнений моделей отдельных ее элементов в относительных единицах (о.е.) в системе вращающихся ортогональных координат, жестко связанных с рабочим колесом ЦН, $d-q$. Уравнения каждого отдельного элемента модели сформированы [36–38] со своими допущениями с использованием характерных для элемента системы базовых величин. Для связи между моделями однотиповых элементов применены соответствующие коэффициенты перехода между системами базовых величин.

Обобщенная ММ установившихся режимов ЭТК построена из следующих математических моделей:

1. центробежного насоса – на основании преобразованной схемы замещения;
2. гидравлической сети – на основании упрощенной схемы замещения трубопровода;
3. асинхронного и синхронного двигателей – с учетом нелинейного статического магнитного сопротивления главной магнитной цепи;
4. механической связи двигателя с ЦН – на основании равенства механических моментов и скоростей вращения общего вала двигателя и ЦН;
5. двухобмоточного трансформатора – на основании Т-образной схемы замещения с учетом нелинейного статического магнитного сопротивления главной магнитной цепи;
6. преобразователя частоты и напряжения (ПЧ) – в виде уравнений балансов активной и реактивной мощностей;
7. устройства поперечной компенсации реактивной мощности (УПК) – в виде емкости с учетом потерь активной мощности;
8. линии электропередачи (ЛЭП) – на основании П-образной схемы замещения;
9. статической нагрузки (СН) – в виде статических характеристик мощностей по напряжению;
10. электроэнергетической системы (ЭЭС) в виде источника синусоидальной ЭДС с конечным индуктивным сопротивлением;
11. ММ гидравлических связей между насосными агрегатами в составе многоагрегатного комплекса и распределения рабочей жидкости между ними;
12. ММ управления отдельным насосным агрегатом.

Модели 2–10 детально описаны в [38]. Кроме этого, при построении ММ конкретного ЭТК их вид может меняться в зависимости от необходимой степени детализации в каждом конкретном случае. Поэтому ограничимся в настоящей работе подробным раскрытием содержания моделей 1, 11 и 12.

Модель 1. За основу взята схема замещения ЦН, разработанная на основе ЭГДА проф. В.С. Костышиным [8]. Уравнения ММ установившихся режимов ЦН составлены с учетом всех диссипативных потерь энергии в конструктивных элементах насоса (диффузоре, спиральном отводе, уплотнениях и т.д.), которые отображены в активных гидросопротивлениях. Инерционные свойства жидкости, не вызывающие диссипативных потерь энергии в элементах ЦН, учтены в индуктивных гидросопротивлениях. Количество уравнений ММ исходной модели ЦН уменьшено путем эквивалентного преобразования.

С учетом дросселя и байпаса, влияние которых мы учли в форме изменения внутренних параметров насоса, нами предложена преобразованная схема замещения ЦН, изображенная на рис. 1. На этой схеме единичного насоса: H_0 – расчетный напор идеализированного (без учета потерь и с бесконечным количеством бесконечно тонких лопастей) ЦН; $Q_{ЦН}$, $H_{ЦН}$ – действительная объемная продуктивность и напор рабочей жидкости реального ЦН соответственно; $Q_Д$, $H_Д$ – действительные объемная продуктивность и напор рабочей жидкости реального ЦН с учетом дросселя и байпаса соответственно; $R_{др}$, $R_{бп}$ – эквивалентные диссипативные гидросопротивления дросселя и байпаса (они являются функциями поворота заслонок); $Z_{1e}(\omega_p, k_v)$, $Z_{2e}(\omega_p, k_v)$, $Z_{0e}(\omega_p, k_v)$ – эквивалентные полные гидросопротивления ЦН (они вычисляются для номинального режима через геометрические размеры конструктивных элементов ЦН и являются в данной схеме сложными функциями кинематической вязкости k_v рабочей жидкости и угловой скорости вращения ω_p рабочего колеса).

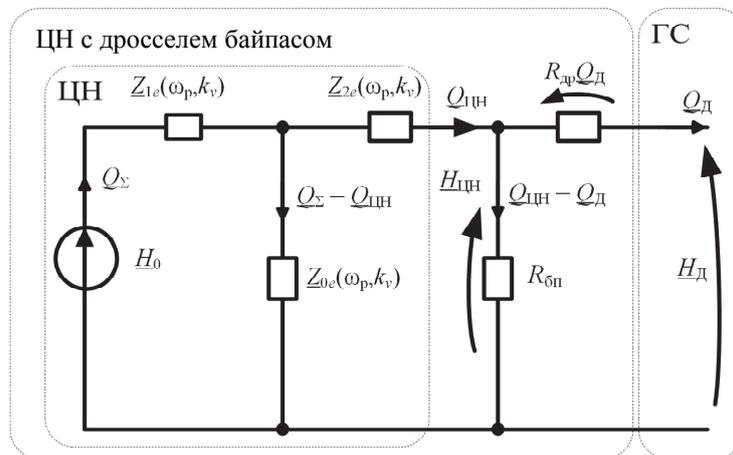


Рис. 1. Преобразованная схема замещения центробежного насоса

Модель 11. Для однозначного распределения суммарных продуктивности $Q_{ДС}$ и напора $H_{ДС}$ рабочей жидкости между управляемыми агрегатами группы введены функции управления напорами $F_H(\mathbf{p}_H)$ каждого из ЦН, гидротракты которых соединены параллельно, и функции управления производительностями $F_Q(\mathbf{p}_Q)$ каждого из ЦН, гидротракты которых соединены последовательно. Эти функции однозначно определяют необходимые для обеспечения задаваемого ими распределения угловые скорости вращения каждого из управляемых ЦН. Уравнения распределения суммарных продуктивности и напора между агрегатами группы имеют следующий вид:

$$H_{Д_k} = F_{H_k}(\mathbf{p}_H), k = 1, 2, \dots, m;$$

$$Q_{Д_j} = F_{Q_j}(\mathbf{p}_Q), j = 1, 2, \dots, p,$$

где \mathbf{p}_H и \mathbf{p}_Q – параметры этих функций управления; в общем случае ими могут быть произвольные параметры элементов, координаты режимов СЭ, ГС, потребителей жидкости и (или) их комбинация.

Связь между всеми ЦН агрегатов и ГС установлена на основании конфигурации гидравлической подсистемы с учетом функций управления $F_{H_k}(\mathbf{p}_H)$ и $F_{Q_j}(\mathbf{p}_Q)$. Уравнения ГС и каждого из ЦН сформированы в о.е. с использованием таких коэффициентов перехода между системами базовых величин:

$$k_{Q_{ЦН,j,i}} = Q_{ЦН,\delta_{j,i}} / Q_{ЦН,\delta}; k_{H_{ЦН,j,i}} = H_{ЦН,\delta_{j,i}} / H_{ЦН,\delta}; k_{Q_{ГС}} = Q_{ГС,\delta} / Q_{ГС,\delta}; k_{H_{ГС}} = H_{ГС,\delta} / H_{ГС,\delta}.$$

Возьмем за основу схему гидравлических соединений ЦН, показанную на рис. 2. На рис. 2 изображена группа агрегатов, которая состоит из параллельно соединенных гидротрактами p подгрупп. Нумерация этих подгрупп такая: $j=1, 2, \dots, p$. Каждая j -ая подгруппа состоит из разного количества m_j последовательно соединенных гидротрактами агрегатов. Нумерация этих агрегатов в каждой из групп

такая: $i=1,2, \dots, m_j$. Таким образом, вся группа состоит из $n = \sum_{j=1}^p m_j$ агрегатов. В дальнейшем для каждого i -го агрегата A , который размещен в j -й подгруппе, использовано обозначение $A_{j,i}$. Под понятием «агрегат $A_{j,i}$ » можно, в свою очередь, рассматривать группу агрегатов.

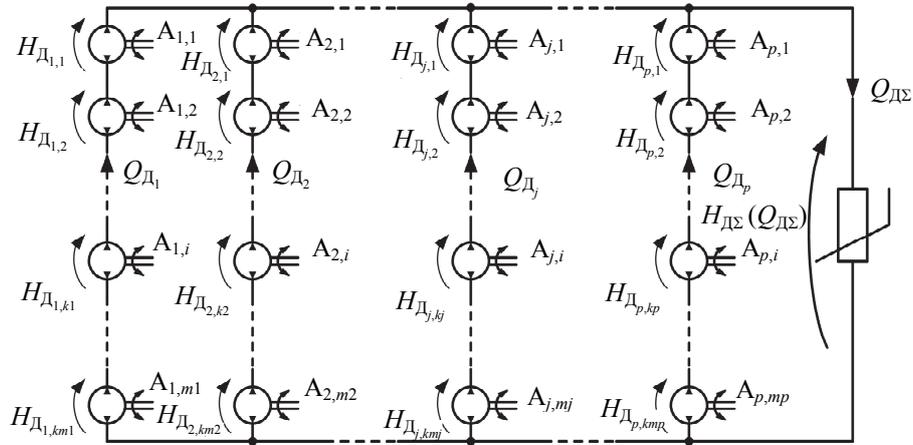


Рис. 2. Схема гидравлических соединений центробежных насосов агрегатов

Уравнение связи между ГС и группой агрегатов по производительности устанавливается на основе баланса производительностей и имеет вид

$$\sum_{j=1}^p (k_{Q,цн,j,i} Q_{Дj,i}) - k_{Q,гс} Q_{ДΣ} = 0, \quad i - \text{произвольное, количество уравнений: } 1. \quad (1)$$

Уравнение связи между ГС и группой агрегатов по напору устанавливается на основе баланса напоров и имеет вид

$$\sum_{i=1}^{m_j} (k_{H,цн,j,i} H_{Дj,i}) - k_{H,гс} H_{ДΣ} = 0, \quad j - \text{произвольное, количество уравнений: } 1. \quad (2)$$

Уравнения распределения производительностей между ЦН группы имеют вид

$$k_{Q,цн,j,i} Q_{Дj,i} - k_{Q,гс} F_{Q_j}(\mathbf{p}_{Q_j}) = 0, \quad j = \overline{1, p-1}, \quad i - \text{произвольное, количество уравнений: } p-1. \quad (3)$$

Уравнения распределения напоров последовательно соединенных гидротрактами ЦН в j -ой группе имеют вид

$$k_{H,цн,j,i} H_{Дj,i} - k_{H,гс} F_{H_{j,i}}(\mathbf{p}_{H_{j,i}}) = 0, \quad j = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, m_j - 1}, \quad \text{количество уравнений: } n-p. \quad (4)$$

Равность производительностей m_j последовательно соединенных гидротрактами ЦН в каждой j -ой подгруппе отображается следующими уравнениями:

$$k_{Q,цн,j,i} Q_{Дj,i} - k_{Q,цн,j,i+1} Q_{Дj,i+1} = 0, \quad j = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, m_j - 1}, \quad \text{количество уравнений: } n-p. \quad (5)$$

Равность напоров p параллельно соединенных гидротрактами подгрупп отображается следующими уравнениями:

$$\sum_{i=1}^{m_j} (k_{H,цн,j,i} H_{Дj,i}) - \sum_{i=1}^{m_{j+1}} (k_{H,цн,j+1,i} H_{Дj+1,i}) = 0, \quad j = \overline{1, p-1}, \quad \text{количество уравнений: } p-1. \quad (6)$$

Для изображенной на рис. 2 схемы комбинированного соединения гидротрактами ЦН получаем следующее количество уравнений связи: $1+1+(p-1)+(n-p)+(n-p)+(p-1)=2n$.

В матрично-векторной форме уравнения (1)–(6) ММ гидравлических соединений многоагрегатной системы насосов и гидросети принимают вид

$$\mathbf{f}_{св}(\mathbf{X}_{св}) = \mathbf{0},$$

где $\mathbf{X}_{св} = (Q_{ДΣ}, H_{ДΣ}, \mathbf{Q}_Д, \mathbf{H}_Д)_t$ – вектор-столбец координат режима гидравлических соединений многоагрегатной системы;

$$\mathbf{Q}_Д = (Q_{Д1,1}, \dots, Q_{Д1,m_1}, Q_{Д2,1}, \dots, Q_{Д2,m_2}, \dots, Q_{Дj,1}, \dots, Q_{Дj,m_j}, \dots, Q_{Дp,1}, \dots, Q_{Дp,m_p});$$

$$\mathbf{H}_Д = (H_{Д1,1}, \dots, H_{Д1,m_1}, H_{Д2,1}, \dots, H_{Д2,m_2}, \dots, H_{Дj,1}, \dots, H_{Дj,m_j}, \dots, H_{Дp,1}, \dots, H_{Дp,m_p}).$$

Модель 12. ММ управления отдельным насосным агрегатом реализована для:

- 12.1. управления напряжением и (или) частотой напряжения статоров двигателей ЦН – в виде отдельных уравнений, описывающих в каждом конкретном случае те или иные законы управления угловой скоростью вращения двигателей;
- 12.2. управления при наличии фазного ротора – в составе ММ 3 АД;
- 12.3. активного управления – путем переключения соответствующих насосных агрегатов в генераторный режим с рекуперацией энергии (отображается в ММ 1 как изменение направления напора или продуктивности рабочей жидкости ЦН);
- 12.4. изменения условий работы ЦН (дресселем и байпасом) – в составе ММ 1 ЦН;
- 12.5. применения вариаторов – в составе ММ 4 механической связи двигателя с ЦН.

Для построения ММ обобщенного ЭТК введено понятие блока электроприводного центробежного насосного агрегата (БЦНА). Модель i -го БЦНА, структурная схема которого изображена на рис. 3, формируется из моделей 1, 3, 4–7.

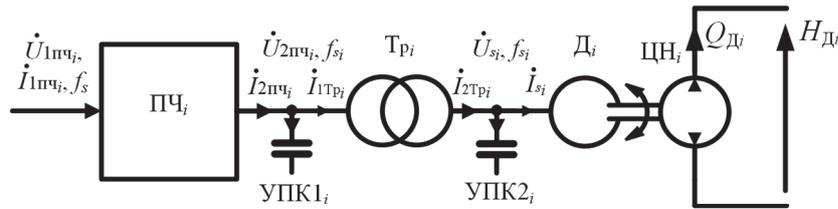


Рис. 3. Структурная схема блока центробежного насосного агрегата

На рис. 3 символами \dot{U} , \dot{I} , f обозначены комплексные напряжения узлов и токи ветвей структурной схемы БЦНА (на входах и выходах ПЧ, УПК, обмотках Тр и статора двигателя), а также частоты этих напряжений и токов соответственно.

С целью достижения максимально возможной адаптации разработанной авторами ММ для тех или иных конкретных условий представим обобщенный ЭТК в виде структурной схемы, показанной на рис. 4, условно разделив его на две части: СЭ и группу БЦНА с ГС, между которыми существуют электрические связи по напряжению и току.

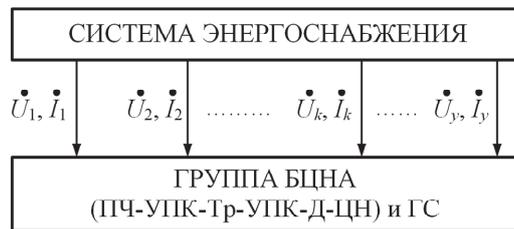


Рис. 4. Структурная схема обобщенного электротехнического комплекса «система энергоснабжения – насосная станция»

Такое представление необходимо потому, что различные агрегаты группы могут получать питание от одних и тех же шин или от шин с разным уровнем напряжения. Эта информация становится известной лишь при анализе конкретной схемы СЭ (трансформаторы звеньев T_k не показаны на рис. 4). Таким образом, сформировав математическую модель СЭ и объединив ее с помощью уравнений связи с ММ группы БЦНА, мы получим ММ установившихся режимов обобщенного ЭТК.

С учетом того, что схема присоединения БЦНА к СЭ заранее неизвестна, уравнения связи между СЭ и группой БЦНА целесообразно записать в таком виде:

$$U_{нд_k} - U_{1пч_d_{gk}} = 0, \quad g_k = \overline{1, w_k}, \quad k = \overline{1, y};$$

$$U_{нq_k} - U_{1пч_q_{gk}} = 0, \quad g_k = \overline{1, w_k}, \quad k = \overline{1, y};$$

$$I_{ндm_k} - I_{упк_d_{k,2}} - I_{снд_{k,2}} - \sum_{g_k=1}^{w_k} I_{1пч_d_{gk}} = 0, \quad k = \overline{1, y};$$

$$I_{нqm_k} - I_{упк_q_{k,2}} - I_{сн_q_{k,2}} - \sum_{g_k=1}^{w_k} I_{1пч_q_{gk}} = 0, \quad k = \overline{1, y},$$

где $U_{нд_k}, U_{нq_k}$ – ортогональные составляющие напряжения обмотки низшего напряжения (НН) трансформатора T_k k -го звена; $U_{1пч_d_{gk}}, U_{1пч_q_{gk}}$ – ортогональные составляющие входного напряжения ПЧ g_k -го БЦНА, присоединенного к k -му звену; $I_{ндm_k}, I_{нqm_k}$ – ортогональные составляющие тока обмотки НН

понижающего трансформатора T_k k -го звена; $I_{\text{унк}d_{k,2}}, I_{\text{унк}q_{k,2}}$ – ортогональные составляющие тока УПК k -го звена; $I_{\text{сн}d_{k,2}}, I_{\text{сн}q_{k,2}}$ – ортогональные составляющие тока СН k -го звена; $I_{\text{пч}d_{gk}}, I_{\text{пч}q_{gk}}$ – ортогональные составляющие входного тока ПЧ g_k -го БЦНА, присоединенного к k -му звену; W_k – количество БЦНА, частотные преобразователи которых присоединены к k -му звену.

Общее количество уравнений связи равно

$$N_{\text{у.ГР-СЭ}} = 2y + 2n_{\text{Ад}} + 2n_{\text{СД}}.$$

На основании данных о количестве уравнений и неизвестных для группы БЦНА, СЭ и связи СЭ с группой БЦНА и ГС получаем систему, состоящую из следующего количества уравнений и неизвестных:

$$N_{\text{у.ЭТК}} = N_{\text{у.ГР}} + N_{\text{у.СЭ}} + N_{\text{у.ГР-СЭ}} = 38n_{\text{Ад}} + 36n_{\text{СД}} + 26y + 26 \text{ уравнений}$$

$$\text{с } N_{\text{н.ЭТК}} = N_{\text{н.ГР}} + N_{\text{н.СЭ}} + N_{\text{н.ГР-СЭ}} = 38n_{\text{Ад}} + 36n_{\text{СД}} + 26y + 27 \text{ неизвестным,}$$

где $N_{\text{у.ЭТК}}, N_{\text{н.ЭТК}}$ – количество уравнений и неизвестных обобщенного ЭТК соответственно; $n_{\text{Ад}}, n_{\text{СД}}$ – количество асинхронных и синхронных БЦНА соответственно; y – количество звеньев СЭ (рис. 4).

В матрично-векторной форме система уравнений ММ принимает вид

$$\mathbf{f}_{\text{ЭТК}}(\mathbf{X}_{\text{ЭТК}}) = \mathbf{0}, \tag{7}$$

где $\mathbf{X}_{\text{ЭТК}}$ – вектор-столбец координат режима ЭТК. Уравнение (7) является ничем иным, как одномерной ($N_{\text{н.ЭТК}} - N_{\text{у.ЭТК}} = 1$) неявной характеристикой ЭТК в $N_{\text{н.ЭТК}}$ – мерном пространстве координат его установившегося режима [39]. Вектор $\mathbf{X}_{\text{ЭТК}}$ является совокупностью $N_{\text{н.ЭТК}}$ координат установившегося режима ЭТК в этом пространстве:

$$\mathbf{X}_{\text{ЭТК}} = (X_1, X_2, \dots, X_v, \dots, X_{N_{\text{н.ЭТК}}})_t. \tag{8}$$

Произвольную координату X_v вектора (8) можно принять за независимую. Тогда все остальные координаты этого вектора становятся зависимыми от нее:

$$\mathbf{X}_{\text{ЭТК}}^v = (X_1, X_2, \dots, X_{v-1}, X_{v+1}, \dots, X_{N_{\text{н.ЭТК}}-1}, X_{N_{\text{н.ЭТК}}})_t = \Phi(X_v), \tag{9}$$

где $\mathbf{X}_{\text{ЭТК}}^v$ – вектор-столбец зависимых от X_v координат установившегося режима обобщенного ЭТК.

В этом случае уравнение (7) превращается в нуль-мерную характеристику и описывает установившийся режим ЭТК, который определяется $N_{\text{н.ЭТК}} - 1$ координатами вектора $\mathbf{X}_{\text{ЭТК}}^v$. Последовательно присваивая числовые значения избранной независимой координате X_v и решая каждый раз нелинейную систему конечных уравнений (НСКУ) (7) численным методом, мы получаем функциональные зависимости (9) вектора $\mathbf{X}_{\text{ЭТК}}^v$ всех остальных зависимых от нее координат. Иными словами, мы получаем функциональные зависимости всех координат установившегося режима от заданной независимой координаты. Например, задавая ряд различных значений расхода жидкости ГС, мы рассчитываем все остальные координаты установившегося режима всех элементов ЭТК.

Для поиска нулевых приближений с целью решения НСКУ математической модели использован дифференциальный метод в форме h -характеристик [39]. Для решения НСКУ многоагрегатного ЭТК применен метода Левенберга–Марквардта.

Заключение

Анализ современного состояния моделирования электротехнических комплексов систем энерго-снабжения насосных станций позволяет сделать вывод об отсутствии эффективного средства анализа их установившихся режимов, при помощи которого можно было бы непосредственно учитывать взаимное влияние гидравлических и электромагнитных параметров и координат режима, оперируя непосредственно внутренними параметрами элементов.

Создание обобщенной математической модели установившихся режимов путем композиции моделей неразрывно связанных его подсистем различной физической природы позволило получить эффективное средство для прогнозирования и исследования установившихся режимов таких объектов. С необходимой степенью детализации модель позволяет рассчитывать произвольные энергетические, электромагнитные и гидравлические координаты режима, исследовать их взаимное влияние.

Созданная модель может быть использована как для выбора оптимального варианта исполнения при проектировании новых комплексов, так и для анализа и прогнозирования режимов действующих объектов во время их эксплуатации, а также для получения алгоритмов и схем управления ими с целью повышения энергосбережения. Также она может быть использована в качестве основы для разработки специализированного программного обеспечения в составе автоматизированных систем проектирования.

Литература

1. Ткачук А.А. Основные типы изменений рабочих характеристик насосных агрегатов водопроводных насосных станций // Проблемы водоснабжения, водоотведения и гидравлики.

References

1. Tkachuk A.A. Main types of changes in the performance of pumping units of water pumping stations. *Problemy Vodosnabzheniya, Vodoovedeniya i Gidravliki*, 2006, no. 7,

2006. № 7. С. 43–50.
- Misiunas D., Lambert M.F., Simpson A.R., Asce M., Olsson G. Burst detection and location in water transmission pipelines // *Proc. World Water and Environmental Resources Congress*, 2005. doi: 10.1061/40792(173)11
 - Eker I. Hydro turbine speed control using robust cascade governor controllers // *European Transactions on Electrical Power*, 2004. V. 14. N 5. P. 293–310. doi: 10.1002/etep.23
 - Малиновский А.А., Турковский В.Г., Музычак А.З. Методика анализа и совершенствования режимов систем централизованного теплоснабжения с зависимым присоединением абонентов // *Научный вестник НГУ*, 2014. № 1. С. 85–91.
 - Kallesoe C.S., Knudsen T. Self calibrating flow estimation in waste water pumping stations // *Proc. Control Conference (ECC)*. Aalborg, Denmark, 2016. doi: 10.1109/ECC.2016.7810263
 - Miedema S.A. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a pump/pipeline system // *Proc. 17th Annual Meeting and Technical Conference of the Western Dredging Association*. New Orleans, 1996.
 - Алексенко А.В. Реализация комплексной модели центробежного насоса на базе его макромодели // *Вестник СумГУ. Тех. науки*, 2007. № 1. С. 5–14.
 - Костышин В.С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии. Ивано-Франковск, 2000. 163 с.
 - Garcia D., Stickland L., Liskiewicz G. Dynamical system analysis of unstable flow phenomena in centrifugal blower // *Open Engineering*, 2015. V. 5. N 1. P. 332–342. doi: 10.1515/eng-2015-0036
 - Berten S., Dupont Ph., Farhat M., Avellan F. Rotor-stator interaction induced pressure fluctuations: CFD and hydroacoustic simulations in the stationary components of a multistage centrifugal pump // *Proc. ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference*. San Diego, USA, 2007. V. 2. P. 963–970. doi:10.1115/FEDSM2007-37549
 - Сипайлов В.А., Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю. Оптимальное управление установкой электроцентробежного насоса с частотно регулируемым асинхронным приводом // *Изв. вузов. Электромеханика*, 2009. № 4. С. 66–69.
 - Кириллов А.Л., Якимчук Г.С. Моделирование процесса управления системой перегрузки углеводородных жидких топлив // *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*, 2009. № 2(24). С. 5–7.
 - Orlovskis G., Ketners K. Start-up and reverse analysis of induction motor model in pump regime // *Power and Electrical Engineering*, 2013. V. 31. P. 117–122.
 - Vasquez H., Parker J.K. A new simplified mathematical model for a switched reluctance motor in a variable speed pumping application // *Mechatronics*, 2004. V. 14. N 9. P. 1055–1068. doi: 10.1016/j.mechatronics.2004.04.007
 - Zargari N., Pande M., Paes R. A medium voltage AC drive for oil sands applications // *IEEE Canadian Review*, 2008. N 57. P. 31–37.
 - Алексеева Ю.А., Коренькова Т.В. Энергетическая эффективность регулируемого насосного агрегата при стабилизации технологического параметра // *Вестник КДПУ*, 2007. № 3(44). Ч. 2. С. 107–111.
 - Кинчур А.Ф. Моделирование электропривода насосной станции системы водоснабжения // *Вестник НТУ ХПИ*, 2008. № 30. С. 241–242.
 - Mermoud A. Pump behaviour modelling for use in a general PV simulation software // *Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Paris, 2004.
 - Куцик А.С., Лозинский А.О., Кинчур А.Ф. Математическая модель системы «частотно-управляемый электропривод – насос – водопроводная сеть» // *Вестник Национального университета «Львовская политехника». Электроэнергетические и электромеханические системы*, 2015. № 834. С. 4855.
 - Kiselichnik B., Bodson M. Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter // *Russian Electrical Engineering*, 2011. V. 82. N 2. P. 69–75. doi: 10.3103/S1068371211020088
 - Pechenik M., Kiselychuk O., Buryan S. Experimental research of interactive energy saving controller of water supply pump // pp. 43–50.
 - Misiunas D., Lambert M.F., Simpson A.R., Asce M., Olsson G. Burst detection and location in water transmission pipelines. *Proc. World Water and Environmental Resources Congress*, 2005. doi: 10.1061/40792(173)11
 - Eker I. Hydro turbine speed control using robust cascade governor controllers. *European Transactions on Electrical Power*, 2004, vol. 14, no. 5, pp. 293–310. doi: 10.1002/etep.23
 - Malinovskyi A.A., Turkovskiy V.H., Muzychak A.Z. Methodology of analysis and improvement of modes of district heating systems with direct connection of consumers. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2014, no. 1, pp. 85–91. (In Ukrainian)
 - Kallesoe C.S., Knudsen T. Self calibrating flow estimation in waste water pumping stations. *Proc. Control Conference, ECC*. Aalborg, Denmark, 2016. doi: 10.1109/ECC.2016.7810263
 - Miedema S.A. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a pump/pipeline system. *Proc. 17th Annual Meeting and Technical Conference of the Western Dredging Association*. New Orleans, 1996.
 - Aleksenko A.V. Implementation of a complex model of a centrifugal pump based on its macromodel. *Vestnik SumGU. Tekh. Nauki*, 2007, no. 1, pp. 5–14.
 - Kostyshin V.S. *Modeling of Operating Modes of Centrifugal Pumps Based on Electrohydraulic Analogy*. Ivano-Frankovsk, 2000, 163 p.
 - Garcia D., Stickland L., Liskiewicz G. Dynamical system analysis of unstable flow phenomena in centrifugal blower. *Open Engineering*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 332–342. doi: 10.1515/eng-2015-0036
 - Berten S., Dupont Ph., Farhat M., Avellan F. Rotor-stator interaction induced pressure fluctuations: CFD and hydroacoustic simulations in the stationary components of a multistage centrifugal pump. *Proc. ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference*. San Diego, USA, 2007, vol. 2, pp. 963–970. doi:10.1115/FEDSM2007-37549
 - Sipailov V.A., Bukreev V.G., Sipailova N.Yu. Optimal control of rotary pump installation with adjustable-frequency asynchronous drive. *Russian Electromechanics*, 2009, no. 4, pp. 66–69.
 - Kirilov A.L., Yakimchuk G.S. Modeling of control of the transfer system for hydrocarbon liquid fuels. *Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotekhnicheskie Kompleksy i Sistemy*, 2009, no. 2, pp. 5–7.
 - Orlovskis G., Ketners K. Start-up and reverse analysis of induction motor model in pump regime. *Power and Electrical Engineering*, 2013, vol. 31, pp. 117–122.
 - Vasquez H., Parker J.K. A new simplified mathematical model for a switched reluctance motor in a variable speed pumping application. *Mechatronics*, 2004, vol. 14, no. 9, pp. 1055–1068. doi: 10.1016/j.mechatronics.2004.04.007
 - Zargari N., Pande M., Paes R. A medium voltage AC drive for oil sands applications. *IEEE Canadian Review*, 2008, no. 57, pp. 31–37.
 - Alekseeva Yu.A., Koren'kova T.V. Energy efficiency of the controlled pumping unit with technology parameter stabilization. *Transactions of KrNU*, 2007, no. 3–2, pp. 107–111.
 - Kinchur A.F. Electric drive modeling of the pump station of the water supply system. *Vestnik Nacional'nogo Tehnicheskogo Universiteta "HPI"*, 2008, no. 30, pp. 241–242.
 - Mermoud A. Pump behaviour modelling for use in a general PV simulation software. *Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. Paris, 2004.
 - Kutsik A.S., Lozinskii A.O., Kinchur A.F. Mathematical model of the system "frequency-controlled electric drive - pump - water supply network". *Vestnik Nacional'nogo Universiteta L'vovskaya Politehnika. Elektroenergeticheskie i Elektromekhanicheskie Sistemy*, 2015, no. 834, pp. 4855.
 - Kiselichnik B., Bodson M. Nonsensor control of centrifugal water pump with asynchronous electric-drive motor based on extended Kalman filter. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82, no. 2, pp. 69–75. doi: 10.3103/S1068371211020088
 - Pechenik M., Kiselychuk O., Buryan S. Experimental research of interactive energy saving controller of water supply pump based on flow rate measurement. *Transactions of*

- based on flow rate measurement // Transactions of Kharkiv National Technical University. 2010. N 28. P. 272–274.
22. Popovich M., Kiselychuk O., Buryan S. Extremal electromechanical control system of water supply pumps connected in series // Вестник КГУ им. Михаила Остроградского. 2010. № 3–2. С. 37–41.
 23. Попович М.Г., Киселичник А.И. Вопросы теории автоматизации многоагрегатного насосных станций на основе принципа пассивности // Техническая электродинамика. 2006. № 5. С. 54–59.
 24. Соколовский А.Ф. Контроль режимов насосов в интерактивной электромеханической системе автоматического управления параллельно работающими агрегатами // Вестник ЖДТУ. 2012. №1(60). С. 64–68.
 25. Ebrahim O.S., Bard M.A., Algendy A.S., Jain P.K. ANN-based optimal energy control of induction motor drive in pumping applications // Proc. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2010. V. 25. N 3. P. 652–660. doi: 10.1109/TEC.2010.2041352
 26. Lozynskiy A.O., Kutsyk A.S., Kinchur O.F. The research of efficiency of the use of neuropredictor in the control system of water-supply pump electric drive // Scientific Bulletin of National Mining University. 2017. N 1. P. 93–99.
 27. Приймак Б.И., Бурьян С.А., Халимовская А.М. Оценка производительности центробежной насосной установки на основе нейронной сети // Вестник НТУ ХПИ. 2008. № 30. С. 589–591.
 28. Nasser A.A., Nasser M.A., El-Shirbeeney E.H.T., Abdel-Rahman S.M. Modal analysis of a centrifugal pump // Proc. 16th Int. Modal Analysis Conference. Santa Barbara, USA, 1998. V. 1. P. 550–557.
 29. Hernandez-Solis A., Carlsson F. Diagnosis of submersible centrifugal pumps: a motor current and power signature approaches // EPE Journal. 2010. V. 20. N 1. P. 58–64. doi: 10.1080/09398368.2010.11463749
 30. Perovic S., Unsworth P.J., Higham E.H. Fuzzy logic system to detect pump faults from motor current spectra // Proc. Industry Applications Conference. Chicago, USA, 2001. V. 1. P. 274–280.
 31. Мoшнориз М.М. Алгоритм работы системы управления группой параллельно работающих насосов станции водоснабжения // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. 2011. № 1. С. 68–69.
 32. Harihara P.P., Parlos A.G. Fault diagnosis of centrifugal pumps using motor electrical signals / In: Centrifugal Pumps. Ed. Papantonis D. InTech, 2012. P. 15–32. doi: 10.5772/26439
 33. Kallesoe C.S. Fault Detection and Isolation in Centrifugal Pumps. PhD thesis. Aalborg, Denmark, Department of Control Engineering, Aalborg University, 2005. 211 p.
 34. Garcia-Hernandez A., Wilcox M., Moore T. Hydraulic modeling and simulation of pumping systems // Proc. 26th International Pump Users Symposium. Houston, USA, 2010. P. 81–88.
 35. Гриценко К.Г., Червяков В.Д. Энергоэффективные методы дискретно-непрерывного управления насосными станциями системы водоснабжения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2005. № 6/2(18). С. 4–8.
 36. Gogolyuk P., Lysiak V., Grinberg I. Mathematical modeling of a synchronous motor and centrifugal pump combination in steady state // Proc. IEEE PES Power Systems Conference & Exposition. New York, 2004. V. 3. P. 1444–1448. doi: 10.1109/PSCE.2004.1397473
 37. Gogolyuk P., Lysiak V., Grinberg I. Influence of frequency control strategies on induction motor-centrifugal pump unit and its modes // Proc. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics. Cambridge, 2008. V. 3. P. 656–661. doi: 10.1109/ISIE.2008.4676893
 38. Лысяк В.Г. Математическое моделирование установившихся режимов системы электроснабжения насосной станции // Техническая электродинамика. 2008. № 2. С. 43–51.
 39. Фильц Р.В., Лябук Н.Н. Математическое моделирование явнополусных синхронных машин. Львов: Свит, 1991. 172 с.
 - Kharkiv National Technical University, 2010, no. 28, pp. 272–274.
 22. Popovich M., Kiselychuk O., Buryan S. Extremal electromechanical control system of water supply pumps connected in series. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2010, no. 3, pp. 37–41.
 23. Popovich M.G., Kiselichnik A.I. Theory of automation of multi-unit pumping stations based on the principle of passivity. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika*, 2006, no. 5, pp. 54–59.
 24. Sokolovskii A.F. Control of pump modes in an interactive electromechanical automatic control system in parallel operating units. *The Journal of Zhytomyr State Technological University*, 2012, no. 1, pp. 64–68.
 25. Ebrahim O.S., Bard M.A., Algendy A.S., Jain P.K. ANN-based optimal energy control of induction motor drive in pumping applications. *Proc. IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 652–660. doi: 10.1109/TEC.2010.2041352
 26. Lozynskiy A.O., Kutsyk A.S., Kinchur O.F. The research of efficiency of the use of neuropredictor in the control system of water-supply pump electric drive. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2017, no. 1, pp. 93–99.
 27. Priimak B.I., Bur'yan S.A., Khalimovskaya A.M. The estimator of productivity of the centrifugal pump installation on the basis of a neural network. *Vestnik Nacional'nogo Tehnicheskogo Universiteta "HPI"*, 2008, no. 30, pp. 589–591.
 28. Nasser A.A., Nasser M.A., El-Shirbeeney E.H.T., Abdel-Rahman S.M. Modal analysis of a centrifugal pump. *Proc. 16th Int. Modal Analysis Conference*. Santa Barbara, USA, 1998, vol. 1, pp. 550–557.
 29. Hernandez-Solis A., Carlsson F. Diagnosis of submersible centrifugal pumps: a motor current and power signature approaches. *EPE Journal*, 2010, vol. 20, no. 1, pp. 58–64. doi: 10.1080/09398368.2010.11463749
 30. Perovic S., Unsworth P.J., Higham E.H. Fuzzy logic system to detect pump faults from motor current spectra. *Proc. Industry Applications Conference*. Chicago, USA, 2001, vol. 1, pp. 274–280.
 31. Moshnoriz M.M. Algorithm of operation of the control system for a group of parallel pumps of a water supply station. *Problemy Energoresursosberezheniya v Elektrotekhnicheskikh Sistemakh*, 2011, no. 1, pp. 68–69.
 32. Harihara P.P., Parlos A.G. Fault diagnosis of centrifugal pumps using motor electrical signals. In *Centrifugal Pumps*. Ed. Papantonis D. InTech, 2012, pp. 15–32. doi: 10.5772/26439
 33. Kallesoe C.S. *Fault Detection and Isolation in Centrifugal Pumps*. PhD thesis. Aalborg, Denmark, Department of Control Engineering, Aalborg University, 2005, 211 p.
 34. Garcia-Hernandez A., Wilcox M., Moore T. Hydraulic modeling and simulation of pumping systems. *Proc. 26th International Pump Users Symposium*. Houston, USA, 2010, pp. 81–88.
 35. Gritsenko K.G., Chervyakov V.D. Energy-efficient methods of discrete-continuous control of pumping stations of the water supply system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2005, no. 6/2, pp. 4–8.
 36. Gogolyuk P., Lysiak V., Grinberg I. Mathematical modeling of a synchronous motor and centrifugal pump combination in steady state. *Proc. IEEE PES Power Systems Conference & Exposition*. New York, 2004, vol. 3, pp. 1444–1448. doi: 10.1109/PSCE.2004.1397473
 37. Gogolyuk P., Lysiak V., Grinberg I. Influence of frequency control strategies on induction motor-centrifugal pump unit and its modes. *Proc. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics*. Cambridge, 2008, vol. 3, pp. 656–661. doi: 10.1109/ISIE.2008.4676893
 38. Lysiak V.G. Mathematical simulation of steady states of a power supply system of a pump station. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika*, 2008, no. 2, pp. 43–51.
 39. Fil'ts R.V., Lyabuk N.N. *Mathematical Simulation of Explicitly Polarized Synchronous Machines*. L'vov, Svit Publ., 1991, 172 p.

Авторы

Лысяк Владислав Георгиевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, Национальный университет «Львівська політехніка», Львов, 79013, Украина, vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua

Шелех Юрий Леонидович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Национальный университет «Львівська політехніка», Львов, 79013, Украина, yurii.l.shelekh@lpnu.ua

Сабат Мирослав Богданович – кандидат технических наук, старший преподаватель, Национальный университет «Львівська політехніка», Львов, 79013, Украина, myroslav.b.sabat@lpnu.ua

Authors

Vladyslav H. Lysiak – PhD, Senior Lecturer, Lviv Polytechnic National University, Lviv, 79013, Ukraine, vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua

Yurii L. Shelekh – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, 79013, Ukraine, yurii.l.shelekh@lpnu.ua

Myroslav B. Sabat – PhD, Senior Lecturer, Lviv Polytechnic National University, Lviv, 79013, Ukraine, myroslav.b.sabat@lpnu.ua