**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДООТЛИВНОЙ УСТАНОВКИ ШАХТЫ НА ВИРТУАЛЬНОМ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ КОМПЛЕКСЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МУЛЬТИФИЗИЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В MATLAB****В. К. Тытук, М. Л. Барановская**

Криворожский национальный университет

ул. Виталия Матусевича, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: dinalt2006@gmail.com

А. П. Черный

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: aleksei.chornyi@gmail.com

Работа посвящена исследованию возможности применения Matlab/Simulink для разработки виртуальных исследовательских комплексов сложных технических систем на примере электромеханической системы шахтной водоотливной установки. Приведен опыт создания интерактивного виртуального исследовательского комплекса насосной установки в Matlab®/Simulink, что позволяет повысить точность математической модели виртуального исследовательского комплекса. В исследовании поставленных задач использовались общие методы математики, физики, гидравлики и вычислительной математики. Численное решение уравнений математической модели и визуализация полученных результатов выполнена в среде Matlab®/Simulink. Рассмотрены математические модели отдельных компонентов шахтной водоотливной установки с использованием элементов библиотек SimPower и Hydraulics Matlab®/Simulink, предложено формироватьлицевую панель виртуального исследовательского комплекса с помощью набора компонентов библиотеки Dashboard. Разработана реализация исследовательского комплекса для водоотливной установки горизонта 275 м. шахты Гвардейская. Приведены результаты работы разработанного исследовательского комплекса, выполнен анализ энергопотребления при различных методах регулирования производительности насоса. Использование Matlab®/Simulink позволяет существенно упростить разработку математической модели исследуемого объекта, дает возможность выполнения широкого спектра исследований характеристик различной физической природы.

Ключевые слова: виртуальный исследовательский комплекс, водоотливная установка, мультифизическое моделирование, Matlab®.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ШАХТНОЇ ВОДОВІДЛИВНОЇ УСТАНОВКИ
НА ВИРТУАЛЬНОМУ ДОСЛІДНИЦЬКОМУ КОМПЛЕКСІ З ВИКОРИСТАННЯМ
МУЛЬТИФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У MATLAB****В. К. Титук, М. Л. Барановська**

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: dinalt2006@gmail.com

О. П. Чорний

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: aleksei.chornyi@gmail.com

Робота присвячена дослідженню можливості застосування Matlab®/Simulink для розробки віртуальних дослідницьких комплексів складних технічних систем на прикладі електромеханічної системи шахтної водовідливної установки. Наведено досвід створення інтерактивного віртуального дослідного комплексу насосної установки в Matlab®/Simulink, що дозволяє підвищити точність математичної моделі віртуального дослідного комплексу. У дослідженні поставлених завдань використовувалися загальні методи математики, фізики, гідравліки та обчислювальної математики. Чисельне рішення рівнянь математичної моделі та візуалізація отриманих результатів виконана в середовищі Matlab®/Simulink. Розглянуто математичні моделі окремих компонентів шахтної водовідливної установки з використанням елементів бібліотек SimPower і Hydraulics Matlab®/Simulink, запропоновано формувати лицьову панель віртуального дослідного комплексу за допомогою набору компонентів бібліотеки Dashboard. Розроблено реалізацію дослідницького комплексу для водовідливної установки горизонту 275 м. Шахти Гвардійська. Наведено результати роботи розробленого дослідного комплексу, виконано аналіз енергоспоживання при різних методах регулювання продуктивності насоса. Використання Matlab®/Simulink дозволяє істотно спростити розробку математичної моделі досліджуваного об'єкта, дає можливість виконання широкого спектру досліджень характеристик різної фізичної природи.

Ключові слова: віртуальний дослідницький комплекс, водовідливна установка, мультифізичне моделювання, Matlab®.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Шахтные водоотливные установки являются одним из наиболее мощных потребителей электроэнергии шахт [1]. В связи с этим исследования энергопотребления водо-

отливных установок остается важной задачей. Шахтные водоотливные установки относятся к потребителям электроэнергии первой категории. Аварийные ситуации в работе таких потребителей вли-

яют на безпеку персоналу і супроводяться значительним економічним збитком. По тому безпосередні експериментальні дослідження на діючому обладнанні, особливо враховуючи його підземне розташування, ускладнені або неможливі. Альтернативним методом дослідження шахтних водоотливних установок в цих умовах є використання віртуальних дослідницьких комплексів, заснованих на математичному моделюванні досліджуваних об'єктів. Подібний підхід знайшов широке застосування для дослідження автономних джерел електроживлення з асинхронним генератором [2], систем активного регулювання параметрів насосних комплексів [3], для навчання студентів [4]. В якості середовища розробки таких віртуальних комплексів частіше за все використовується програма LabView, яка забезпечує простоту роботи з зовнішніми пристроями і можливість створення високоякісних інструментальних панелей, імітують роботу реального обладнання.

Основним вимогою при створенні віртуальних дослідницьких комплексів для реального технічного обладнання є забезпечення високого рівня адекватності математичної моделі досліджуваного об'єкта, простота зміни внутрішньої структури об'єкта і його параметрів.

Шахтні водоотливні установки представляють собою складну електродинамічну систему, включаючи насосні установки з різними схемами з'єднання насосних агрегатів, розгалужену гідротранспортну мережу, характеризувану наявністю протидіючого тиску, і гідродинамічного опору, величина якого залежить від довжини, діаметра, матеріалу стінок трубопроводу і використаної запірної арматури. Найбільш поширеним типом електроприводу водоотливних установок в умовах залізничних шахт є короткозамкнений асинхронний двигун.

Енергопотребление водоотливных установок тесно связано с режимами работы насосных агрегатов и гидротранспортной сети. Наиболее ответственной проблемой здесь является определение характеристик волновых процессов в гидротранспортной сети. Волновые процессы, протекающие в коммуникационной сети турбомеханизма, оказывают существенное влияние на момент сопротивления электропривода и его энергопотребление. Использование преобразовательных устройств для регулирования угловой скорости насосной установки дополнительно усложняет структуру исследуемой электромеханической системы.

Таким образом, адекватная модель шахтной водоотливной установки должна включать в себя отдельные объекты, уравнения которых описывают процессы различной физической природы, в частности электромеханическое преобразование энергии и неустановившееся движение жидкости в длинных трубопроводах.

Успешное решение задачи создания виртуального лабораторного комплекса для исследования технических объектов также сопряжено с созданием качественного пользовательского интерфейса, который позволяет динамически управлять состоянием исследуемого объекта, и скрывает от конечного пользователя сложное устройство его математической модели.

Отсутствие в составе LabView, традиционно применяемой для создания виртуальных лабораторных и исследовательских комплексов, апробированных средств для моделирования сложных технических объектов существенно усложняет задачу создания виртуальных исследовательских комплексов для реальных технических систем.

Целью работы является исследование возможности применения Matlab/Simulink для разработки виртуальных исследовательских комплексов сложных технических систем на примере электро-механической системы шахтной водоотливной установки.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Программа Matlab/Simulink в настоящее время является лидером в разработке систем визуального моделирования и содержит в своем составе библиотеку SimScare, ориентированную на моделирование различных физических процессов и создание математических моделей мультифизических технических систем.

Рассмотрим процесс разработки и исследований виртуального исследовательского комплекса шахтной водоотливной установки.

На рис. 1 представлена схема водоотлива горизонта 275 м ш. Гвардейская Криворожского железнодорожного комбината.

На рис. 2 представлена схема прокладки трубопроводов в насосной камере.

Для откачивания грунтовых вод на горизонте 275 м установлено 6 насосов типа ЦНС-300-420 при емкости водосборника 370 м³. Напорные характеристики насоса ЦНС-300-420 представлены на рис. 3.

В качестве приводного двигателя насоса используется взрывозащищенный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа ВАО -560 LA4 мощностью 800 кВт, с частотой вращения 1490 об/мин. Параметры схемы замещения двигателя ВАО -560 LA4 приведены в табл. 1.

Моделирование асинхронного двигателя выполняется по известным уравнениям в ортогональной системе координат $\alpha, \beta, 0$ [5], с использованием блока Asynchronous Machine SI units библиотеки SimPower systems.

Более подробно остановимся на моделировании гидравлической подсистемы, состоящей из центробежного насоса, регулируемой задвижки и трубопроводной системы с помощью библиотеки Hydraulics – отдельной библиотеки Matlab/Simulink, предназначенной для моделирования гидравлических систем.

Рисунок 1 – Схема водоотлива горизонта 275 м ш. Гвардейская Криворожского железорудного комбината

Рисунок 2 – Схема прокладки трубопроводов в насосной камере

Таблица 1 – Параметры схемы замещения двигателя ВАО -560 LA4

Индуктивное сопротивление рассеивания фазы статора, Ом	$X_{1\sigma} = 3,551$
Индуктивное сопротивление рассеивания фазы ротора, Ом	$X_{2\sigma} = 4,786$
Активное сопротивление фазы статора, Ом	$R_1 = 0,644$
Активное сопротивление фазы ротора, Ом	$R_2 = 0,415$
Индуктивное сопротивление намагничивания, Ом	$X_\mu = 147,7$
Ток намагничивания, А	$I_\mu = 22,196$
Критическое скольжение	$s_k = 0,05$

Рисунок 3 – Напорная характеристика насоса ЦНС-300-420

С помощью продукта Hydraulics инженеры могут рассчитать давление и расход жидкости в системах, построенных на базе стандартных и нестандартных компонентов. Предлагаемые инструменты позволят смоделировать преобразования гидравлической энергии в крутящий момент, приводящий в действие

различные механизмы, а также оценить эффект, вызванный открытием и закрытием клапанов. Для получения максимально точных результатов в состав Hydraulics добавлена библиотека распространенных рабочих жидкостей. Таким образом, пакет Hydraulics позволяет решать задачи статики, кинематики и динамики различных гидравлических систем [2]. В Hydraulics пользователь может строить модель системы так же, как если бы он собирал физическую систему. Используемые в модели символы основаны на стандарте ISO 1219 для гидравлических приводов. В Hydraulics используется подход физической сети для построения моделей: блоки соответствуют физическим элементам, таким как насосы, двигатели и клапаны, которые соединяются линиями, обозначающие физические связи для передачи мощности. Этот подход позволяет описывать физическую структуру системы, а не математику, на которой основана структура.

Из модели, соответствующей гидравлической схеме, Hydraulics автоматически строит уравнения, характеризующие поведение системы. Эти уравнения интегрируются в Simulink модель.

Для моделирования центробежного насоса применяется блок Centrifugal Pump, который позволяет моделировать центробежный насос на основе технических характеристик, предоставленных производителем. Один из вариантов настройки центробежного насоса, а именно *By two 1D characteristics: P-Q and N-Q*, позволяет задать в виде одномерных векторов зависимостей давления насоса P и его потребляемой мощности N от расхода насоса Q . Эти зависимости легко получить, оцифровывая напорные характеристики насоса, приведенные на рис. 3.

На рис. 4 приведен фрагмент окна задания параметров центробежного насоса в блоке Centrifugal Pump.

Рисунок 4 – Фрагмент окна задания параметров блока Centrifugal Pump

Нижче приведено елемент кода, який задає параметри насоса ЦНС-300-420.

% Pump 1

pump1 = struct('Q', [0 0.021 0.042 0.063 0.083 0.104],

... % [m^3/s]

'P', [4530834 4942728 4874079 4668132 4118940 3363801], ... % [Pa]

'N', [19000 20250 21500 22750 24000 25250]); % [Wt]

Структурная схема математической модели насосной станции приведена на рис. 5.

Рисунок 5 – Структурная схема математической модели насосной станции

Насосная станция состоит из приемного резервуара, собственно насоса и подводящего и отходящего трубопроводов, относительно небольшой длины. Для моделирования этих участков трубопровода был использован элемент Resistive Pipe LP, который моделирует участок трубопровода как элемент с сосредоточенными потерями давления, что при малой длине трубопровода вполне допустимо.

Для моделирования задвижки насоса был применен элемент Variable Orifice, схема включения которого изображена на рис. 6.

Рисунок 6 – Модель задвижки на основе элемента Variable Orifice

Изменение положения задвижки моделируется изменением управляющего сигнала на входе *Ctrl*.

Трубопроводная система водоотливной установки состоит из вертикально восстающего участка длиной 275 м и отводящего горизонтального участка длиной 1200 м. Схема модели трубопроводной системы изображена на рис. 7.

Рисунок 7 – Модель трубопроводной системы водоотливной установки

Для моделирования этих участков трубопровода был использован элемент Segmented Pipe LP, который моделирует работу трубопровода с учетом его распределенных свойств и инерции движения жидкости. Такой подход позволяет анализировать работу трубопроводной системы с учетом волновых процессов, возникающих в трубопроводе при изменении скорости насоса и переключений запорной арматуры.

Одним из важнейших элементов виртуального исследовательского комплекса является панель управления и визуализации данных. В версии Matlab 2015a появилась библиотека элементов Dashboard, предназначенная для динамического управления моделями и отображения результатов их работы, что создает широкие возможности создания интерактивных виртуальных исследовательских комплексов.

Используя описанные выше модели отдельных элементов шахтной водоотливной установки, был разработан целостный интерактивный виртуальный исследовательский комплекс, предназначенный для исследования режимов энергопотребления насосной

установки, оснащенной регулируемым асинхронным электроприводом, при регулировании скорости насоса и положения задвижки магистрального трубопровода.

Управление угловой скоростью вращения приводного двигателя и положением заслонки осуществляется с помощью рукояток (Knob) в процессе работы модели. Результаты работы исследуемой системы сохраняются при нажатии на кнопку в переменную рабочей области Matlab и доступны для последующей обработки.

Внешний вид виртуального исследовательского комплекса шахтной водоотливной установки в процессе его работы представлен на рис. 8.

Ниже представлены результаты работы отдельных элементов водоотливной установки. На рис. 9,а показана временная диаграмма запуска приводного асинхронного двигателя, на рис. 9,б, в – временные диаграммы производительности насосной установки на задвижке (Q_0) и на нагрузке (Q_L) соответственно при регулировании заслонки и при регулировании угловой скорости насосной установки.

Рисунок 8 – Виртуальный исследовательский комплекс шахтной водоотливной установки в Matlab

Рисунок 9 – Временные диаграммы работы виртуального исследовательского комплекса:

а – угловая скорость при запуске приводного АД; производительность насосной установки на задвижке (Q_0) и на нагрузке (Q_L) при б – регулировании положения задвижки; в) – регулировании угловой скорости насоса

Полученные числовые результаты и характер процессов подтверждают адекватность рассматриваемой математической модели шахтной водоотливной установки.

С помощью разработанного комплекса был выполнен сравнительный анализ энергопотребления электропривода насоса при регулировании производительности задвижкой и частотой вращения. Полученные результаты приведены на рис. 10.

Рисунок 10 – Сравнительный анализ энергопотребления электропривода насоса при регулировании производительности задвижкой и частотой вращения

Полученные результаты полностью совпадают как с общетеоретическими представлениями об энергопотреблении насоса при разных способах регулирования производительности, так и с результатами других исследований [7]. Это совпадение подтверждает адекватность работы как отдельных элементов, так и целостного виртуального исследовательского комплекса.

Обращает на себя внимание простота настройки модели технической системы, особенно ее гидравлической части. С помощью элементов библиотеки Hydraulics легко конструировать разветвленные гидротранспортные системы, изменять параметры насоса и приводного двигателя, не затрагивая общую структуру виртуального комплекса.

ВЫВОДЫ. Обосновано, что успешная разработка и проектирование современных электромехатронных систем тесно связана с внедрением идей вычислительного мышления в процесс обучения современных специалистов-электромехаников.

В настоящей работе обосновывается важность мультидисциплинарного подхода к разработке электромехатронных систем, в качестве CAD-системы для разработки и исследования электромехатронных систем предложено использовать Matlab®/Simulink с необходимыми расширениями.

В работе рассмотрены методы автоматизации создания математической модели сложных механических систем, которые являются важной конструктивной особенностью современных электромехатронных систем. Предложен подход к автоматизации создания системы дифференциальных уравнений сложных механических систем на основе уравнений Лагранжа второго рода с применением символьных вычислений в среде Matlab®. Показано, что работа сформированной таким способом модели двухзвенного плоского маятника совпадает с работой модели, составленной из блоков Simscape Multibody.

ЛІТЕРАТУРА

1. Братченко Б. Ф. Стационарные установки шахт. Под общей ред. Б. Ф. Братченко. Москва : «Недра», 1977. 440 с.
2. Zachepa N., Zachepa Yu., Sergiienko S. Virtual research complex «Autonomous power supply with asynchronous generator». *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2015. № 4 (32). Р. 10–17.
3. Перекрест А. Л., Коренькова Т. В., Родькин Д. И. Системы активного регулирования параметров насосных комплексов. Монография. Кременчук : ЧП Щербатых А.В., 2011. 180 с.
4. Vince T., Balvirčák R. Remote laboratories evolution. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2015. № 3 (31). Р. 168–175.
5. Чорний О. П., Толочко О. І., Титюк В. К., Родькін Д. Й., Чекавський Г. С. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами. Монографія. Кременчук : Щербатих О. В., 2016. 299 с.
6. Агафонов Е. Д., Миронов А. Г., Безбородов Ю. Н. Об учете скорости распространения волн давления при моделировании неуставившихся процессов с помощью MATLAB/SIMHYDRAULICS. *Информатика, вычислительная техника и управление. Вестник ИрГТУ*. № 8 (103). С.12–19.
7. Руппель А. А., Сагандыков А. А., Корытов М. С. Моделирование гидравлических систем в MATLAB. Омск : СибАДИ, 2009. 171 с.

RESEARCH OF THE MINE DRAINAGE STATION ON THE VIRTUAL RESEARCH COMPLEX USING MULTIPHYSIC MODELING IN MATLAB

V. Tytiuk, M. Baranovska

Kryvyi Rih National University

vul. Vitalia Matusevicha, 11, 50027, Ukraine. E-mail: dinalt2006@gmail.com

O. Chornyi

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: alekseii.chornyi@gmail.com

Purpose. The work is devoted to the study of the possibility of using MATLAB®/Simulink for the development of virtual research complexes of complex technical systems on the example of the electromechanical system of a mine drainage station. **Originality.** The experience of creating an interactive virtual research complex pumping unit in MATLAB®/Simulink, which allows to increase the accuracy of the mathematical model of a virtual research complex. **Methodology.** In the study of the tasks used, the general methods of mathematics, physics, hydraulics and computational mathematics were used. The numerical solution of the equations of the mathematical model and the visualization of the obtained results were made in the MATLAB®/Simulink environment. **Results.** Mathematical models of individual components of a mine water-removal unit are considered using elements of the SimPower and Hydraulics MATLAB®/Simulink libraries, it is proposed to form the front panel of a virtual research complex using the Dashboard components set. The implementation of a research complex for a mountain water drainage facility has been developed. 275 m. Mine Guards. The results of the work of the developed research complex are presented, the analysis of energy consumption with various methods of pump capacity control is carried out. **Practical value.** Using MATLAB®/Simulink allows you to significantly simplify the development of a mathematical model of the object under study, allows you to perform a wide range of studies of the characteristics of different physical nature. References 7, figures 10.

Key words: virtual research complex, mine drainage station, multiphysical modeling, MATLAB®.

REFERENCES

1. Bratchenko, B. F. (1977). *Statsionarnye ustanovki shakht* [Stationary installations of mines]. Moscow: Nedra. [in Russian]
2. Zachepa, N., Zachepa, Yu., & Sergiienko, S. (2015). Virtual research complex «Autonomous power supply with asynchronous generator». *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 4 (32), 10–17.
3. Perekrest, A. L., Korenkova, T. V., & Rodkin, D. I. (2011). *Sistemy aktivnogo regulirovaniya parametrov nasosnykh kompleksov. Monografiya* [Active control systems of parameters of pumping complexes. Monograph]. Kremenchuk: ChP Shcherbatykh A.V. [in Russian]
4. Vince, T., & Balvirčák, R. (2015). Remote laboratories evolution. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 3 (31), 168–175.
5. Chornyi, O., Tolochko, O., Tytyuk, V., Rodkin, D., & Chekavskiy, G. (2016). *Matematichni modeli ta osoblivosti chiselnikh rozrakhunkiv dinamiki elektroprivodiv z asinkhronnimi dvigunami. Monografiya* [Mathematical models and specifics of numerical calculations of dynamic characteristics of electric drives with induction motors. Monograph]. Kremenchuk: Shcherbatikh O. V.
6. Agafonov, E., Mironov, A., & Bezborodov, Yu. Ob ucheite skorosti rasprostraneniya voln davleniya pri modelirovanii neustanovivshikhsya protsessov s pomoshchyu MATLAB/SIMHYDRAULICS. *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i upravlenie. Vestnik IrGTU*, 8 (103), 12–19.
7. Ruppel, A. A., Sagandykov, A. A., & Korytov, M. S. (2009). *Modelirovanie gidravlicheskich sistem v MATLAB* [Hydraulic systems modeling in MATLAB]. Omsk: SibADI.

Стаття надійшла 03.06.2019.