

DOI 10.54596/2958-0048-2023-4-118-128

УДК 681.513.2:371.69

МРНТИ 59.01.85

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЖНЫМИ НАСОСАМИ В ДРЕНАЖНЫХ КОЛОДЦАХ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB

Насиев Д.Ш.<sup>1</sup>, Герасимова Ю.В.<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева,  
Петропавловск, Республика Казахстан

\*E-mail: julyvic@mail.ru

### Аннотация

Скопление влаги вследствие летних ливней или из-за резкого таяния снега, могут привести к деформации фундамента зданий, появлению на нем трещин и прогибов, а также выбросу вредных веществ в окружающую среду. Дренажные системы, особенно в городской инфраструктуре, играют важную роль в эффективной обработке сточных вод и поддержании уровня грунтовых вод на безопасном уровне. Автоматическое управление погружными насосами в таких системах имеет решающее значение для оптимизации процесса дренажа и минимизации рисков наводнений. В данной статье разрабатывается модель системы автоматического управления погружным насосом в дренажных колодцах, которая включает в себя компоненты, такие как водосборный колодец, исполнительный механизм вентиля дренажного трубопровода, насос и датчик уровня. Модель была создана в программной среде MatLab с помощью прикладного пакета Simulink, который позволил смоделировать и анализировать процесс поступления воды в водосборный колодец и ее откачку при помощи насоса, а также детально изучить, как отдельные блоки системы реагируют на поступившую воду. Результаты этой работы могут быть полезными для инженеров и проектировщиков, работающих в области гидротехнической инженерии. Они могут использовать модель для оптимизации систем управления, а также для прогнозирования и анализа производительности водосточных систем.

**Ключевые слова:** дренажная система с автоматическим управлением, водосборный колодец, исполнительный механизм, погружной насос, математическое описание звеньев, Simulink-модель.

## МATLAB БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ОРТАСЫНДА ДРЕНАЖДЫҚ ҰНҒЫМАЛАРДАҒЫ СУҢГУІР СОРАПТАРДЫ АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

Насиев Д.Ш.<sup>1</sup>, Герасимова Ю.В.<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,  
Петропавл, Қазақстан Республикасы

\*E-mail: julyvic@mail.ru

### Аңдатпа

Жазғы нөсерден немесе қардың кенет еруінен ылғалдың жиналуы ғимараттар іргетасының деформациясына, ондағы жарықтар мен майыстардың пайда болуына, сонымен қатар қоршаған ортаға зиянды заттардың шығуына әкелуі мүмкін. Дренаж жүйелері, әсіресе қалалық инфрақұрылымда, ағынды суларды тиімді тазартуда және жер асты суларының деңгейін қауіпсіз деңгейде ұстауда маңызды рөл атқарады. Мұндай жүйелердегі суасты сорғыларын автоматты басқару дренаж процесін оңтайландыру және су тасқыны қаупін азайту үшін өте маңызды. Бұл мақалада дренаждық ұнғымалардағы суасты сорғыларын автоматты басқару жүйесінің үлгісі әзірленеді, оның құрамына дренаждық ұнғыма, дренаждық құбырдың клапанының жетекі, сорғы және деңгей сенсоры сияқты компоненттер кіреді. Модель MatLab бағдарламалық ортасында Simulink қолданбалы пакетін пайдалана отырып жасалды, ол су жинау ұнғымасына судың түсу және оны сорғы арқылы сорып алу процесін модельдеуге және талдауға, сондай-ақ жеке блоктардың қалай жұмыс істейтінін егжей-тегжейлі зерттеуге мүмкіндік берді. жүйенің

кіріс суға реакциясы. Бұл жұмыстың нәтижелері гидротехника саласында жұмыс істейтін инженерлер мен конструкторларға пайдалы болуы мүмкін. Олар модельді басқару жүйелерін оңтайландыру және дренаждық жүйелердің өнімділігін болжау және талдау үшін пайдалана алады.

**Кілттік сөздер:** автоматты басқаруы бар дренаж жүйесі, дренаждық ұңғыма, жетек, суасты сорғы, звенолардың математикалық сипаттамасы, Simulink-моделі.

## MODELING OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR SUBMERSIBLE PUMPS IN DRAINAGE WELLS IN THE MATLAB SOFTWARE ENVIRONMENT

Nasiev D.S.<sup>1</sup>, Gerasimova J.V.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan*

*\*E-mail: julyvic@mail.ru*

### Annotation

The accumulation of moisture due to summer showers or due to sudden melting of snow can lead to deformation of the foundation of buildings, the appearance of cracks and deflections on it, as well as the release of harmful substances into the environment. Drainage systems, especially in urban infrastructure, play an important role in effectively treating wastewater and maintaining groundwater levels at safe levels. Automatic control of submersible pumps in such systems is critical to optimizing the drainage process and minimizing flood risks. This article develops a model of an automatic control system for submersible pumps in drainage wells, which includes components such as a drainage well, a drainage pipeline valve actuator, a pump and a level sensor. The model was created in the MatLab software environment using the Simulink application package, which made it possible to simulate and analyze the process of water entering a water collection well and its pumping out using a pump, as well as to study in detail how individual blocks of the system react to incoming water. The results of this work can be useful for engineers and designers working in the field of hydraulic engineering. They can use the model to optimize control systems and to predict and analyze the performance of drainage systems.

**Keywords:** drainage system with automatic control, drainage well, actuator, submersible pump, mathematical description of links, Simulink-model.

### Введение

Исследование и моделирование автоматизированных дренажных систем является актуальным в современной инженерной практике. Водоотведение и поддержание оптимального уровня воды в различных инфраструктурных объектах имеют большое значение для предотвращения наводнений, сохранения качества почвы и обеспечения эффективной эксплуатации объектов.

В данной статье представлены результаты разработки и моделирования автоматизированной дренажной системы, которая включает в себя различные компоненты, такие как объект управления, исполнительный механизм.

Исследование проводилось с целью моделирования автоматизированной дренажной системы жилых зданий в программной среде MatLab.

В процессе достижения цели были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ требований к автоматизированной дренажной системе жилых зданий и разработана функциональная схема системы, определены ключевые компоненты, их взаимосвязи и функции.

2. Смоделирован исполнительный механизм, который включает двигатель постоянного тока, редуктор и насос.

3. Создана Simulink-модель дренажной системы, включая все рассмотренные компоненты, а также дополнительные элементы, такие как датчик уровня, задающее устройство, элемент сравнения, регулятор и регулирующий орган – вентиль.

Проанализированы характеристики и сделаны выводы о различных компонентах системы и её результативности.

#### **Методы исследования**

В работе используются комплексные методы исследования. В начале, проводится анализ требований и разрабатывается функциональная схема системы, что включает в себя методы системного анализа и инженерного проектирования. Затем используется математическое моделирование для каждого компонента системы, используя математическое уравнение и передаточные функции, что позволяет описать их поведение в контексте дренажной системы. В процессе исследования, также используются анализ результатов симуляции, статистические методы и методы оптимизации для оценки эффективности и надежности автоматизированной дренажной системы.

Simulink-модель дренажной системы, включает в себя модель объекта управления (водосборного колодца), модель исполнительного механизма вентиля дренажного трубопровода, модель насоса и звенья датчиков. Эта модель позволяет симулировать работу системы и анализировать ее поведение в различных сценариях [1].

Модель демонстрирует автоматизированную работу дренажной системы. Когда уровень воды в водосборном колодце достигает верхнего порогового значения, включается насос для откачки воды, и работает исполнительный механизм для регулирования проходного сечения вентиля. Это позволяет поддерживать уровень воды в заданных пределах.

Рисунки и графики исследования представляют результаты моделирования, показывают изменение уровня воды, эффективное проходное сечение вентиля, а также характеристики насоса в разных режимах работы системы.

В целом, работа представляет методологию моделирования и анализа автоматизированной дренажной системы, позволяющей оптимизировать работу системы и управлять уровнем воды в водосборном колодце в различных условиях.

Новизна исследования заключается в том, что она сочетает в себе два ключевых аспекта: современные вычислительные методы, предоставляемые MatLab, и актуальные технические задачи в области строительства и инженерии.

Практическая значимость высока, поскольку применение программной среды MatLab предоставит возможность для моделирования автоматизированных дренажных систем в жилых зданиях и разработки более точных и эффективных решений в сфере инфраструктуры и экологической безопасности. Результаты исследования позволяют пересмотреть эффективность и безопасность управления водными ресурсами в свете вызовов, стоящими перед современными городами и строительной отраслью в целом.

Однозначно, исследование вносит важный вклад в разработку и исследование автоматизированных дренажных систем. Так как эти системы играют решающую роль в обеспечении эффективности и надежности дренажных систем в различных инженерных проектах, таких как водоотведение в городах, сельском хозяйстве, инфраструктурных объектах и многих других сферах.

#### **Результаты исследования**

Созданная математическая модель позволит инженерам при проектировании автоматизированных дренажных систем более глубоко понять процессы, происходящие в системах, и предсказать их поведение в различных условиях работы. Это поспособствует более эффективному управлению системой, увеличению ее производительности и снижению операционных затрат.

Процесс моделирования в исследовании можно разбить на два этапа. Первый этап заключался в описании всех элементов (звеньев) системы с помощью математических уравнений или передаточных функций. Второй этап подразумевал разработку самой модели в программной среде MatLab с помощью прикладного пакета Simulink [2].

Функциональная схема автоматизированной дренажной системы, моделирование которой будет осуществлено далее, представлена на рисунке 1.

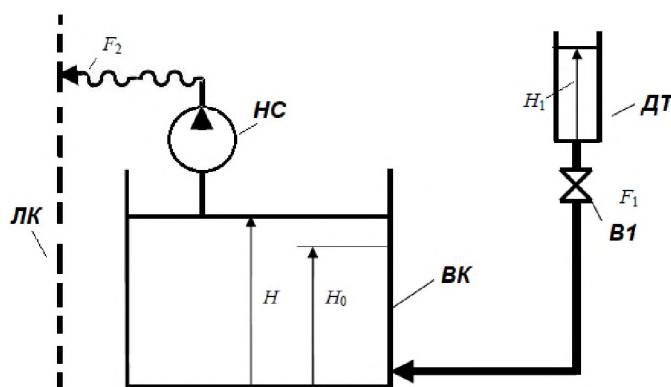


Рисунок 1. Функциональная схема автоматизированной дренажной системы

Всегда существует вопрос о том, насколько точно математическая модель отражает реальное поведение дренажной системы. Даже при хорошей калибровке модели могут возникнуть расхождения. Однако на рисунке 1 наглядно представлено, что объектом управления является водосборный колодец ВК, в котором для нормальной работы насоса должен поддерживаться заданный постоянный уровень  $H_0$  [3]. Вода из дренажного трубопровода ДТ поступает в водосборный колодец ВК.

Важно, что в ДТ уровень жидкости составляет непостоянную величину  $H_1$ . Уровень воды в ВК может изменяться с помощью регулирующего органа (вентиль) В1, проходное сечение которого составляет переменную величину  $F_1$ . Если уровень воды в ВК превысит установленный предел  $H$ , то клапан В1 закроется, и вода из ДТ перестанет поступать в резервный колодец и будет осуществляться отбор жидкости. Стоит учесть, что уровень воды в ВК может измениться. Отбор жидкости из ВК в ливневую канализацию ЛК происходит с помощью насоса НС по гибкому трубопроводу с площадью поперечного сечения  $F_2$ .

Посредством вычислений было получено уравнение объекта управления

$$S_1^0 \sqrt{H_1 + H_0} - S_2^0 \sqrt{H_H} = 0, \quad (1)$$

где  $H_1$  – уровень воды, поступивший из ДТ,

$H_0$  – начальный уровень воды в ВК,

$H_H$  – уровень воды, откачиваемый насосом,

$S_1$  – «эффективное» проходное сечения вентиля В1,

$S_2$  – «эффективный» проходное сечение гибкого трубопровода насоса Н.

На основе данного уравнения была составлена виртуальная модель объекта управления дренажной системы, представленная на рисунке 2.

Simulink-модель объекта управления дренажной системы предоставляет визуальное представление функционирования этой части системы. На модели можно увидеть блоки, представляющие водосборный колодец, вентиль, дренажный трубопровод, уровнемеры, а также элементы системы управления [4].

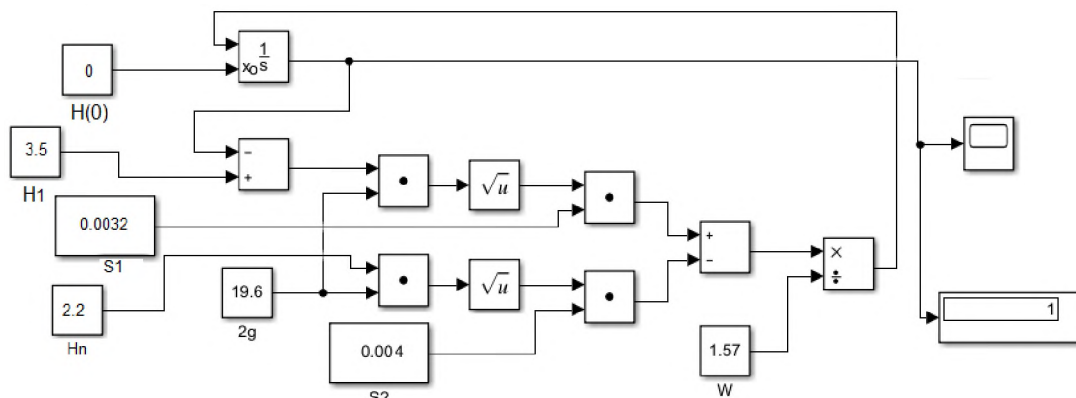


Рисунок 2. Simulink-модель объекта управления дренажной системы

Для последующего упрощения модели всей автоматизированной дренажной системы, модель объекта управления была свернута в один блок «Объект управления», окончательный вид модели показан на рисунке 3.

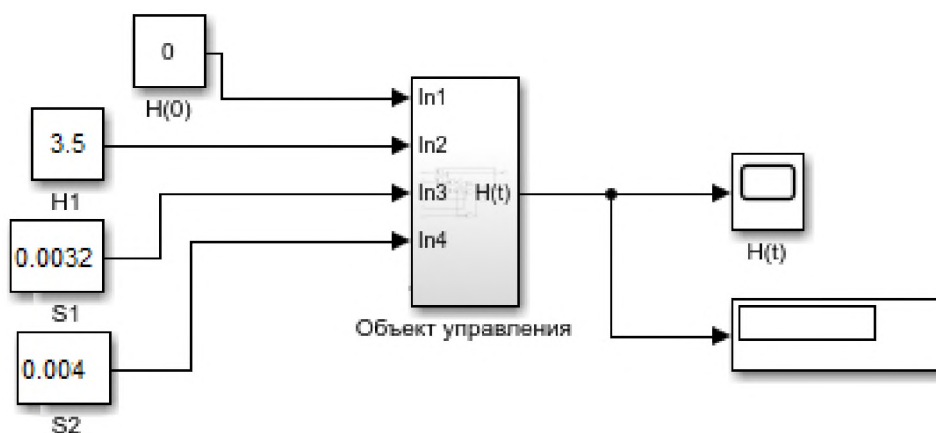


Рисунок 3. Окончательный вид Simulink-модели объекта управления дренажной системы

Свертка модели объекта управления в один блок "Объект управления" в Simulink позволяет значительно упростить визуальное представление и структуру всей автоматизированной дренажной системы. Это повышает читаемость и удобство моделирования, а также позволяет абстрагироваться от подробных деталей внутреннего управления объектом и фокусироваться на более высокоуровневых аспектах системы, таких как взаимодействие между компонентами и общая производительность [4].

При запуске процесса моделирования на экране виртуального осциллографа был получен следующий график, который представлен на рисунке 4.

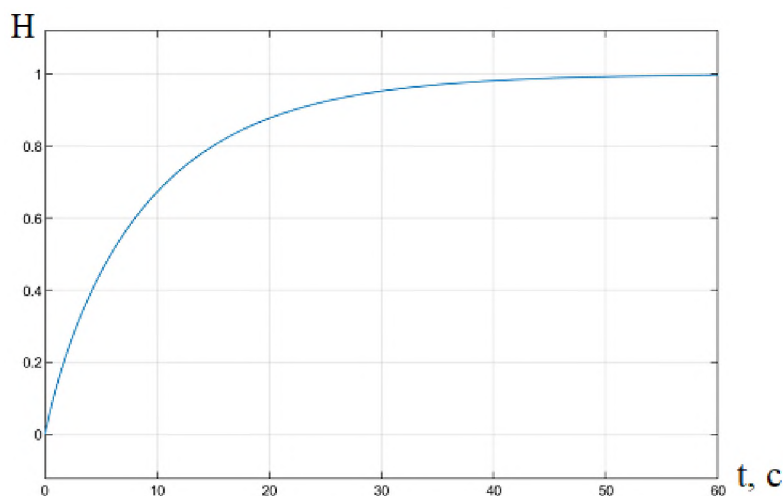


Рисунок 4. Результаты моделирования объекта управления дренажной системы

В результате построения полученный график соответствует номинальному режиму:  $H=3,5$  м,  $S_1= 0,0032$  м<sup>2</sup>,  $S_2=0,004$  м<sup>2</sup>, а условие  $H(0)$  означает, что в начале моделирования водосборный колодец пуст [5].

Исполнительный механизм включает в себя двигатель постоянного тока и редуктор. Выходной вал редуктора служит для открывания и закрывания вентиля В1. При полностью закрытом вентиле угол поворота вала  $\alpha$  считается равным 0:  $\alpha = \alpha_{\min} = 62,8$  рад.

Математическое описание исполнительного механизма можно записать в виде уравнения [1]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_1} (-\omega + k_1 U_a), \quad (2)$$

где  $T_1$  – постоянная времени,

$k_1$  – коэффициент передачи двигателя,

$\omega$  – угловая скорость двигателя постоянного тока,

$U_a$  – напряжение на якорной обмотке.

На основе уравнения (2) была получена Simulink-модель исполнительного механизма (рисунок 5). После получения Simulink-модели исполнительного механизма дренажной системы, можно сказать, что модель включает в себя элементы, представляющие исполнительный механизм, включая вентиль и гибкий трубопровод, а также управляющие сигналы [5].

На выходе модели, представленной на рисунке 5, установлены виртуальные осциллографы. С помощью данных блоков можно наблюдать за состоянием выхода редуктора, изменением скорости исполнительного механизма, величиной управляющего напряжения. Так управляющее напряжение на якоре возрастает от -100 до 200 В, а угловая скорость двигателя изменяется от нулевого начального значения до -20 1/с, а затем безостановочно нарастает до 40 1/с. Угол поворота вала редуктора при моделировании уменьшается от начального значения 30 рад до 0, сохраняет нулевое значение некоторое время, а затем возрастает до верхнего предела 62,8 рад.

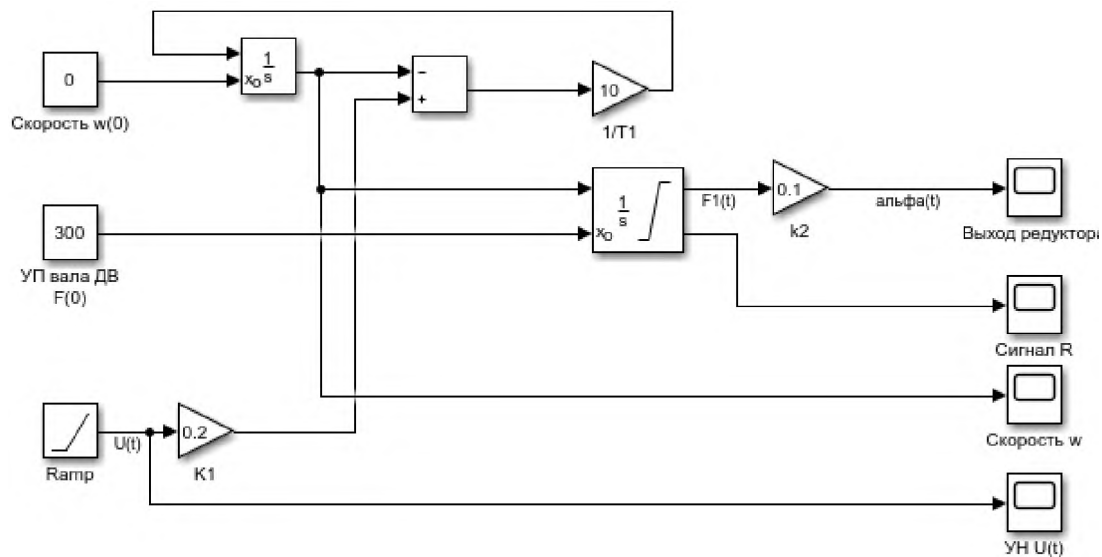


Рисунок 5. Simulink-модель исполнительного механизма

Если управлять производительностью насоса с помощью преобразователя частоты (ПЧ), то уравнение расходно-напорной характеристики [6] примет следующий вид

$$a_2 Q_H^2 + a_1 Q_H \frac{f}{f_{НОМ}} + \left[ a_0 \left( \frac{f}{f_{НОМ}} \right)^2 - H_H \right] = 0, \quad (3)$$

где  $H_H$  – напор, развиваемый насосом,

$Q_H$  – производительность насоса при любом режиме его работы ( $Q_H \neq 0$ ),

$a_0$  – напор, развиваемый насосом, при  $Q_H = 0$ ,

$a_1, a_2$  – постоянные, величины и знаки, которых зависят от формы расходно-напорной характеристики насоса,

$f$  – текущая частота питающего напряжения,

$f_H$  – номинальная частота питающего напряжения для данного насоса.

Номинальное значение частоты питающего напряжения и другие характеристики обычно представлены в технической спецификации насоса. Зададим их равными следующим значениям: расход 3,6 м³/ч, напор 8,5 м, рабочая частота 50 Гц. Значения коэффициентов можно рассчитать воспользовавшись программным обеспечением для аппроксимации функции одной переменной по нескольким точкам. В результате такого расчета:  $a_0 = 11,5$ ,  $a_1 = 5,1667$ ,  $a_2 = -1,6667$ .

После того, как дискриминант становится больше нуля, происходит резкое возрастание расхода. Причина этого заключалась в том, что при расчете в модели использовалось значение напора, соответствующего рабочей точке. На самом деле значение напора квадратично зависит от значения частоты:  $H = k \cdot f^2$ . Чтобы узнать значение коэффициента  $k$ , необходимо знать две точки. Одна, из них – точка (0, 0). Вторая точка – ( $H, f_{НОМ}$ ), напор и номинальная частота питающей сети. В результате учета этих нюансов, спроектировали следующую модель насоса (рисунок 6).

В уравнении 3 неизвестно значение расхода  $Q_H$ . Для его нахождения необходимо вычислить дискриминант. Если значение дискриминанта отрицательное, то получаем

комплексно сопряженные корни. Это препятствует дальнейшим расчетам, поэтому в модели установлен блок сравнения, и если дискриминант меньше нуля, то его значение приравнивается нулю. Далее в модели находятся корни и выбирается больший из них. Большим является правым по оси. В ходе исследования выяснилось, что на графике выходной характеристики зависимости расхода от времени появляются точки излома графика в момент равенства дискриминанта нулю. После того, как дискриминант становится больше нуля, происходит резкое возрастание расхода. Причина этого заключалась в том, что при расчете в модели использовалось значение напора, соответствующего рабочей точке. На самом деле значение напора квадратично зависит от значения частоты:  $H = k \cdot f^2$ . Чтобы узнать значение коэффициента  $k$ , необходимо знать две точки. Одна, из них – точка (0, 0). Вторая точка – ( $H$ ,  $f_{ном}$ ), напор и номинальная частота питающей сети [2]. В результате учета этих нюансов, была спроектирована следующая модель насоса (рисунок 6).

Таким образом, выходными характеристиками в полученной модели насоса являются: объем выкачиваемой воды и уровень выкачиваемой воды. Уровень выкачиваемой воды был рассчитан из формулы определения объема цилиндра, так как водосборный колодец имеет форму цилиндра. При этом площадь основания была выбрана равной 1,57 м, а величина объема получается на выходе модели в результате ее работы [6].

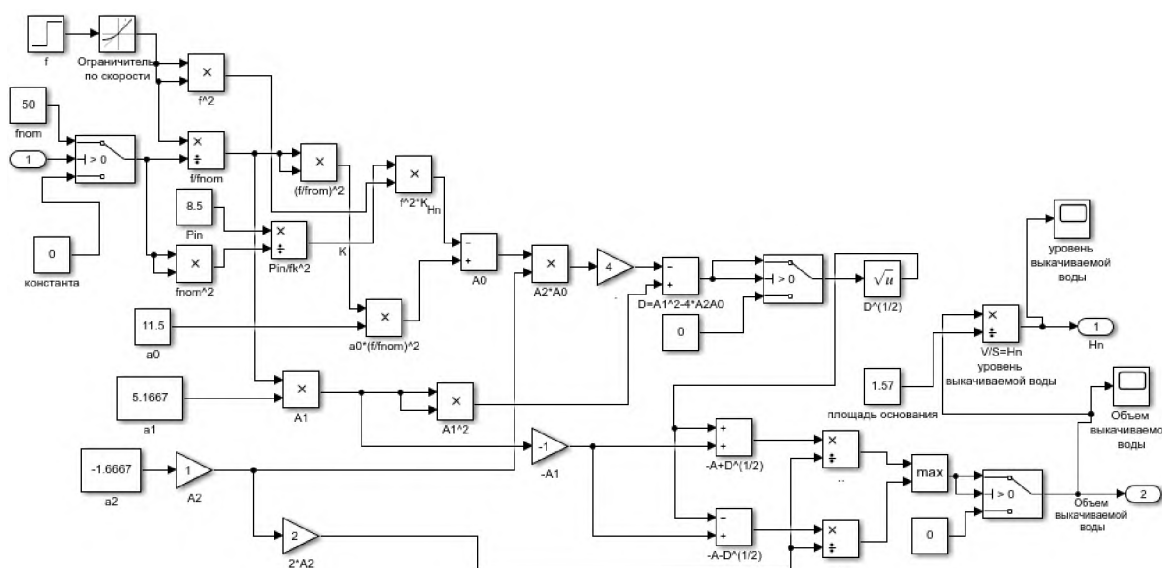


Рисунок 6. Simulink-модель насоса

На рисунке 7 представлена модель всей дренажной системы, она включает в себя модель объекта управления (водосборного колодца), модель исполнительного механизма вентиля дренажного трубопровода, модель насоса, звенья датчиков.



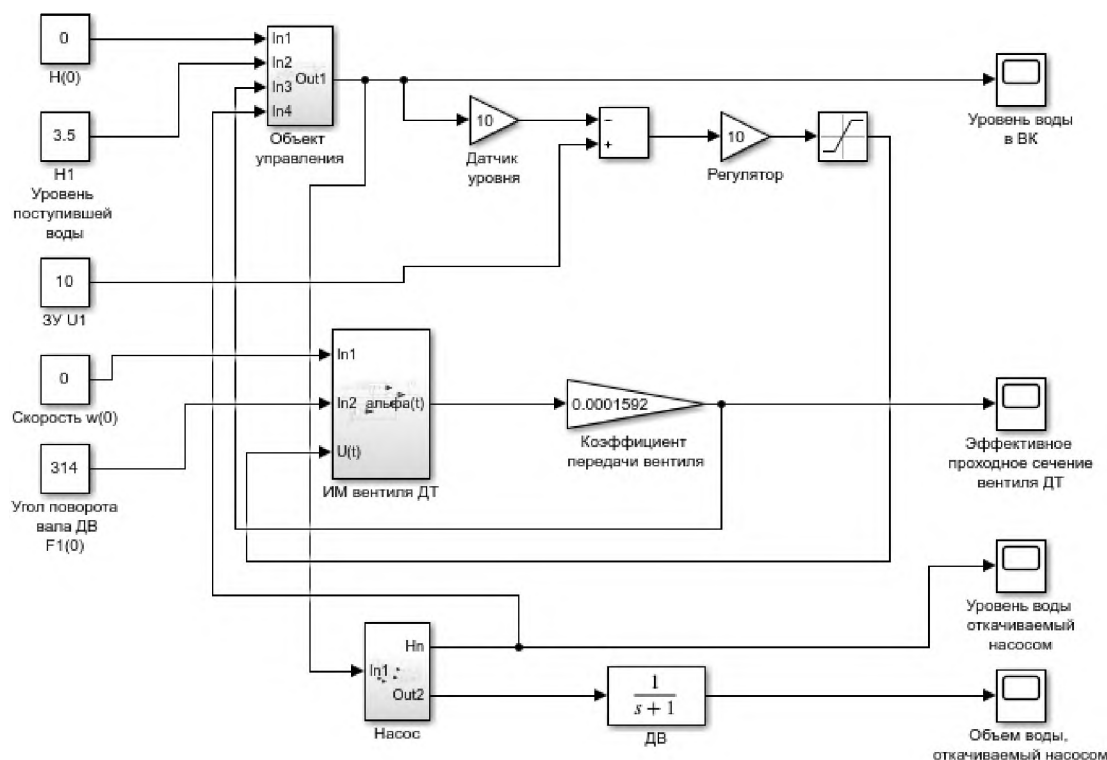


Рисунок 7. Моделирование системы автоматического управления погружными насосами в дренажных колодцах в программной среде MatLab

Согласно созданной модели, можно сделать вывод, что, модель работает по заданному алгоритму: при запуске модели срабатывает исполнительный механизм, вентиль открывается, благодаря чему вода из дренажного трубопровода поступает в водосборный колодец [6]. Когда вода в колодце достигнет установленного верхнего порогового уровня (в данном случае – 3,5 метра), включается насос и осуществляется откачка воды до тех пор, пока уровень воды не достигнет нижнего порогового значения в данном случае – 1 метра (рисунок 8, а).

На рисунке 8 б показана выходная характеристика исполнительного механизма, которая показывает изменение эффективного проходного сечения вентиля дренажного трубопровода за время работы системы. На рисунках 8 в, г показаны выходные характеристики насоса. Первый график соответствует объему откачиваемой воды 3,5 м<sup>3</sup>, а второй уровню воды 2,2 м, откачиваемому насосом.

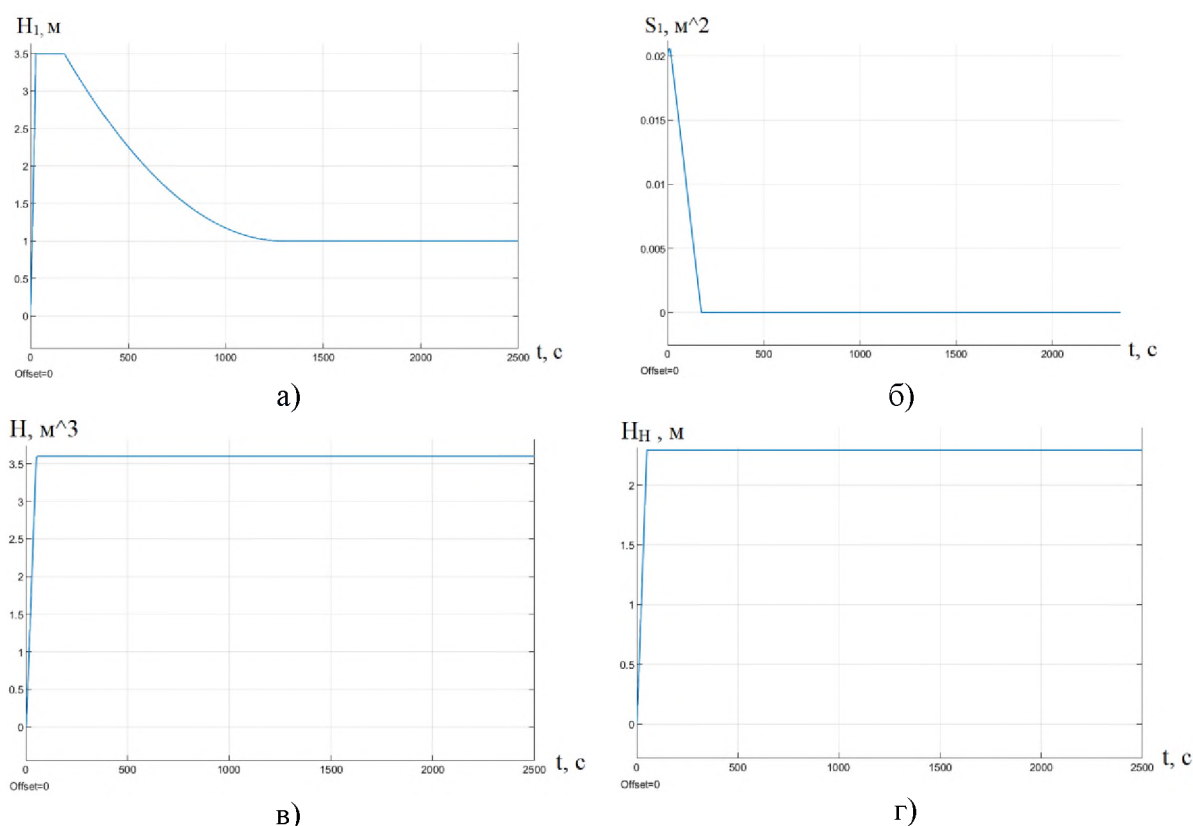


Рисунок 8. Результаты моделирования механизма: а – уровень воды в водосборном колодце; б – эффективное проходное сечение вентиля дренажного трубопровода; в – объем воды, откачиваемый насосом; г – уровень воды, откачиваемый насосом

### Заключение

Исследование позволило на основе математических моделей разработать виртуальную модель автоматизированной дренажной системы жилых зданий, что дает возможность анализировать и управлять подобного рода системами в различных режимах. Результаты исследования охватывают анализ ключевых параметров, влияние начальных условий, и оценку эффективности системы в поддержании заданного уровня жидкости в водосборном колодце. Полученные результаты проведенного научного исследования могут послужить в дальнейшем базой для проведения проектных работ с целью оптимизации и улучшения качества работы автоматизированных дренажных систем.

### Литература:

1. Эггельсманн Р. Руководство по дренажу / Пер. с нем. В.Н. Горинского; Под ред. и с предисл. Ф.Р. Зайдельмана. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 1984. - 247 с.
2. Руппель А.А. Моделирование гидравлических систем в matlab / Руппель А.А., Сагандыков А.А., Корытов М.С.; учебное пособие. – Омск: СибАДИ, 2009. - 172 с.
3. Абсалык, Г.О. Имитационное моделирование насосной установки в режиме остановки насоса / Г.О. Абсалык, А.М. Кочкин. - Текст: непосредственный // Молодой ученый. - 2021. - № 21 (363). - С. 12-16. - <https://moluch.ru/archive/363/81288/> (дата обращения: 15.11.2023).
4. Казанцева А.В., Васильев В.И. Утилизация дренажных вод для коммунальных нужд при строительстве микрорайона. Строительство и экология: теория, практика, инновации: Сборник

докладов 1 Международной научно-практической конференции, Челябинск, 9 марта, 2015. - Челябинск. 2015, с. 21-24, 1 ил. Библ. 9. Рус.; рез. англ.

5. Воронов Ю.В. Проектирование дренажных систем подтапливаемых территорий на основе численного моделирования. ВСТ: Водоснабж. и сан. техн. 2015, N 4, с. 48-54. Рус.

6. Авдеева К.В. Автоматическая дренажная установка / К.В. Авдеева, А.А. Медведева, А.В. Уткина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 1 (29). – С. 56-63.

#### **References:**

1. Eggelsmann R. Drainage Guide / Trans. with him. V.N. Gorinsky; Ed. and with a preface. F.R. Seidelman. - 2nd ed., revised. and additional. - M.: Kolos, 1984. - 247 p.

2. Ruppel A.A. Modeling of hydraulic systems in matlab / Ruppel A.A., Sagandykov A.A., Korytov M.S.; tutorial. - Omsk: SibADI, 2009. - 172 p.

3. Absalyk, G.O. Simulation modeling of a pumping unit in pump stop mode / G.O. Absalyk, A.M. Kochkin. - Text: immediate // Young scientist. - 2021. - No. 21 (363). - P. 12-16. - <https://moluch.ru/archive/363/81288/> (access date: 11/15/2023).

4. Kazantseva A.V., Vasiliev V.I. Utilization of drainage water for municipal needs during the construction of a microdistrict. Construction and ecology: theory, practice, innovation: Collection of reports of the 1st International Scientific and Practical Conference, Chelyabinsk, March 9, 2015. - Chelyabinsk. 2015, p. 21-24, 1 ill. Bible. 9. Russian; res. English.

5. Voronov Yu.V. Design of drainage systems for flooded areas based on numerical modeling. VST: Water supply. and san. tech. 2015, N 4, p. 48-54. Rus.

6. Avdeeva, K.V. Automatic drainage installation [Text] / K.V. Avdeeva, A.A. Medvedeva, A.V. Utkina // News of Transsib / Omsk State. University of Communications. - Omsk. - 2017. - No. 1 (29). - pp. 56-63.