

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЛАВНЫХ НАСОСОВ СУХОГО ДОКА НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

П. Е. Христо

*Одесский национальный политехнический университет*

**Аннотация.** На базе платформы *Arduino Due* и электронасоса *U4814* разработана физическая модель для исследования энергоэффективности насосной станции сухого дока. Она позволила получить оптимальный закон управления напряжением питания электронасоса при поддержании его постоянства и среди кусочно-линейных функций времени благодаря численному решению краевой задачи. Сравнительный анализ конкурирующих управлений подтвердил целесообразность применения регулируемого электропривода.

**Ключевые слова:** регулируемый электропривод, насос, гидравлическая емкость, сухой док, энергосбережение, экстремали, физическая модель, краевая задача, численные методы, *Arduino Due*.

### Введение

Занимаясь более двух лет тематикой энергосберегающего электропривода лопастных гидравлических машин, которые работают в системах опорожнения гидравлических емкостей большого объема, автору удалось с некоторыми допущениями сформулировать и получить решение ряда прикладных задач оптимизации таких систем по критерию энергопотребления [1, 2]. На основании анализа полученных в процессе решения оптимальных программ управления абстрактным объектом было установлено, что по своей постановке задачи данного типа хорошо согласуются со спецификой работы главных насосов сухих (наливных) доков. Эти насосы применяются для откачивания воды из камер сухих доков большинства судостроительных и судоремонтных заводов и входят в состав блочных электронасосных агрегатов, являющихся наиболее мощными потребителями энергии на доковых насосных станциях. Для них характерно существенное и непрерывное изменение геометрической составляющей напора сети в процессе работы [3]. Поэтому результаты решения соответствующих вариационных задач ценны, прежде всего, с точки зрения повышения энергетической эффективности систем опорожнения (наполнения) сухих (наливных) доков [4, 5]. В рамках решения каждой из них производился сравнительный анализ основных показателей объекта до и после оптимизации, благодаря чему можно было судить о степени эффективности, возможности и целесообразности реализации программ оптимального управления. Однако все полученные результаты, основанные на тех или иных допущениях при составлении идеализиро-

ванных математических моделей объекта управления, до сих пор носили чисто теоретический характер и не были подкреплены никакими экспериментальными данными.

### 1. Постановка задачи

Целью данной работы является разработка физической модели насосной установки сухого дока в виде лабораторно-испытательного стенда. Такой стенд должен быть пригоден для измерения опытных показателей системы управления до и после оптимизации, установления основных функциональных зависимостей между этими показателями с приемлемой точностью. Результаты сравнительного анализа экспериментальных данных, а также характеристик, построенных с их помощью, в свою очередь должны послужить основанием для подтверждения или опровержения ранее полученных теоретических результатов оптимизационных расчетов.

### 2. Конструкция физической модели насосной установки сухого дока

Сразу отметим, что при разработке общей компоновки, выборе, изготовлении и сборке основных узлов физической модели не ставилась задача создания масштабной копии насосной станции конкретного сухого дока. Тем не менее, для представительности получаемых с помощью модели результатов эксперимента должны учитываться принципиальные особенности как основного оборудования, применяемого на реальных насосных станциях, так и самого технологического процесса по опорожнению камеры дока-прототипа, в связи с чем желательно, чтобы характерные размеры, а также физические параметры модели и натуры были связаны некоторыми коэффициентами подобия или, по крайней

© Христо П.Е., 2017



мере, не виходили за рамки некоторых заранее установленных границ.

Для доковых насосных станций в целом характерно использование весьма высокопроизводительных и сравнительно низконапорных лопастных гидравлических машин, таких как осевые, диагональные или центробежные насосы с достаточно большими коэффициентами быстроходности. Водоводы главных насосов реальных доков имеют большое живое сечение и относительно малую протяженность, вследствие чего доля потерь напора в местных сопротивлениях и по длине трубопроводов по сравнению с геометрической составляющей напора сети достаточно мала. Напоры этих насосов могут в зависимости от глубины камеры составлять менее 10 м, но в отдельных случаях эти величины доходят до значений порядка нескольких десятков метров, подачи нередко имеют значения свыше десяти тыс. куб. метров в час. Обычно камеру дока обслуживают до четырех главных насосов с индивидуальным приводом от высоковольтных гидроблоков асинхронных двигателей [3].

### **2.1. Гидравлическая часть модели насосной установки сухого дока**

В качестве альтернативы камере сухого дока на стенде используются две водосточные пластиковые трубы диаметром 110 мм, установленные вертикально, заглушенные и имеющие выпуски в нижней части для подсоединения водоводов к насосу. Таким образом, вертикально закрепленные трубы играют роль гидравлических емкостей, а процесс опорожнения камеры дока моделируется посредством перекачивания воды из одной трубы в другую. Высота "наливной" трубы, в которую подается вода, ограничена высотой от пола до потолка в помещении, где установлен стенд и составляет порядка двух с лишним метров. "Сухая" труба, из которой вода откачивается, имеет длину порядка 1 м для удобства обслуживания при первоначальном наполнении или, напротив, – опорожнении системы, когда работа на стенде завершена. Уровень воды в ней лишь немного превышает первоначальный в те моменты времени, когда система возвращается в равновесное состояние при отключении насоса и возникают затухающие остаточные колебания уровня жидкости. Так же, как и на реальном сухом доке, по мере того, как происходит гидравлический переходный процесс, геометрическая составляющая напора сети, определяемая в данном случае разностью уровней в трубах, плавно меняется от нулевого начального значения до установленного конечного максимума. В отличие от модели на реальном доке испытывает

понижение только горизонт сливной призмы камеры, а отметка горизонта акватории, куда сбрасывается вода из камеры, остается все время практически неизменной, но с точки зрения преобразования энергии это различие между моделью и натурой не имеет принципиального значения. Таким образом, для работы системы необходимо залить трубы примерно до половины длины наливной трубы, тогда к окончанию процесса перекачивания разность уровней может быть получена наибольшая. Для защиты от аварийного перелива верхние части труб сообщаются посредством гофрированных сливных трубок. Для подсоединения насоса применены аналогичные трубки, поскольку в отличие от гибких шлангов и гидравлических рукавов их средневзвешенное живое сечение не уменьшается в результате деформаций на растяжение и изгиб, тогда как возможность придания нужной формы без особого труда сохраняется. Кроме этого гофрированные трубки легкие и, что особенно важно для такой системы, выдерживают возникающие во время работы существенные перепады давления водяного столба. Недостатком этих водоводов является то, что они имеют более высокое гидравлическое сопротивление по сравнению с гладкостенными трубками и шлангами, но с другой стороны благодаря повышенному гидравлическому сопротивлению также исключается возможность вихреобразования, которое может наступать при существенном понижении уровня воды в сухой трубе.

### **2.2. Электромеханическая часть модели насосной установки сухого дока**

**2.2.1. Электронасос.** Руководствуясь вышеописанными условиями работы насосных станций сухих доков, автор выбрал в качестве главного электронасосного агрегата модели циркуляционный центробежный электронасос U4814 (существует также аналог этого насоса 92.3780) с номинальной подачей 5200 л/час при напоре порядка 2 м, который имеет коллекторный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов типа ДП63-105-4-24 с номинальным напряжением питания 24 В, номинальной мощностью 105 Вт и применяется в комплекте с жидкостными предпусковыми подогревателями на грузовых автомобилях МАЗ, КРАЗ, автобусах НЕФАЗ, ПАЗ, Икарус, экскаваторах КЭЗ [6, 7]. Этот насос имеет высокое качество изготовления, поскольку является ответственным элементом автомобильного оборудования и, что немаловажно, – его коэффициент быстроходности составляет  $n_s = 330 \text{ мин}^{-1}$ , а это даже несколько больше, чем соответствующий показатель реаль-

но применяемого на доке отечественной постройки (завод «Океан») центробежного насоса двустороннего входа 48Д-22, у которого  $n_s = 218 \text{ мин}^{-1}$  [8]. Тут необходимо уточнить, что коэффициент быстроходности насосов с двусторонним входом определяют, подставляя в формулу значение подачи, которое равно половине номинальной. Поэтому, если бы насос 48Д-22 был односторонним, то при тех же номинальных данных его коэффициент быстроходности был бы равен  $n_s = 308 \text{ мин}^{-1}$ .

Входной и выходной патрубки стендового насоса U4814 имеют диаметр 38 мм, что соответствует наибольшему проходному сечению среди всех насосов со сходными параметрами, рассматривавшихся, как альтернативный вариант.

**2.2.2. Преобразователь напряжения.** Для регулирования напряжения питания двигателя насоса применяется контроллер Volta k24/250DC (так же известен его аналог SPD-24250A), рассчитанный на подключение коллекторного двигателя постоянного тока привода велосипеда с номинальным напряжением питания 24 В и потребляемой мощностью 250 Вт [9]. Достоинством этой модели широтно-импульсного преобразователя наряду с его стоимостью является наличие полноценного канала управления с типовым диапазоном изменения напряжения задания 1...4 В, предназначенного в штатном исполнении для подключения аналогового датчика Холла SS49Е, встроенного в ручку акселератора электровелосипеда [10].

Поверочные испытания, однако, показали, что скажность импульсов напряжения на выходе контроллера Volta k24/250DC, установленного на стенде, меняется от минимума 1,3 % (при этом двигатель насоса неподвижен, поскольку напряжение недостаточно для развертывания вала якоря) до максимума 100 %, если напряжение задания варьировать в пределах 1,265...3,850 В.

**2.2.3. Источник питания.** В качестве источника питания электронасоса используется батарея из двух последовательно соединенных свинцово-кислотных тяговых аккумуляторов 6DZM8/2HR, которые имеют номинальное напряжение 12 В и емкость 8 А·ч [11]. Такие аккумуляторы имеют герметичную конструкцию и являются необслуживаемыми на весь период эксплуатации, обладают достаточно низким уровнем саморазряда. Номинальный разрядный ток аккумулятора составляет примерно 4 А, что также соответствует работе электронасоса в режиме, который близок к номинальному.

**2.2.4. Микропроцессорный модуль управления модели насосной установки сухого дока.** Электрическая схема принципиальная подключения основных компонентов модуля управления модели насосной установки сухого дока представлена на рис. 1. Основным элементом микропроцессорного модуля управления является контроллер Arduino DUE, который имеет высокопроизводительный 32-разрядный Cortex-M3 ARM микропроцессор AT91SAM3X8E, работающий с тактовой частотой 84 МГц [12].

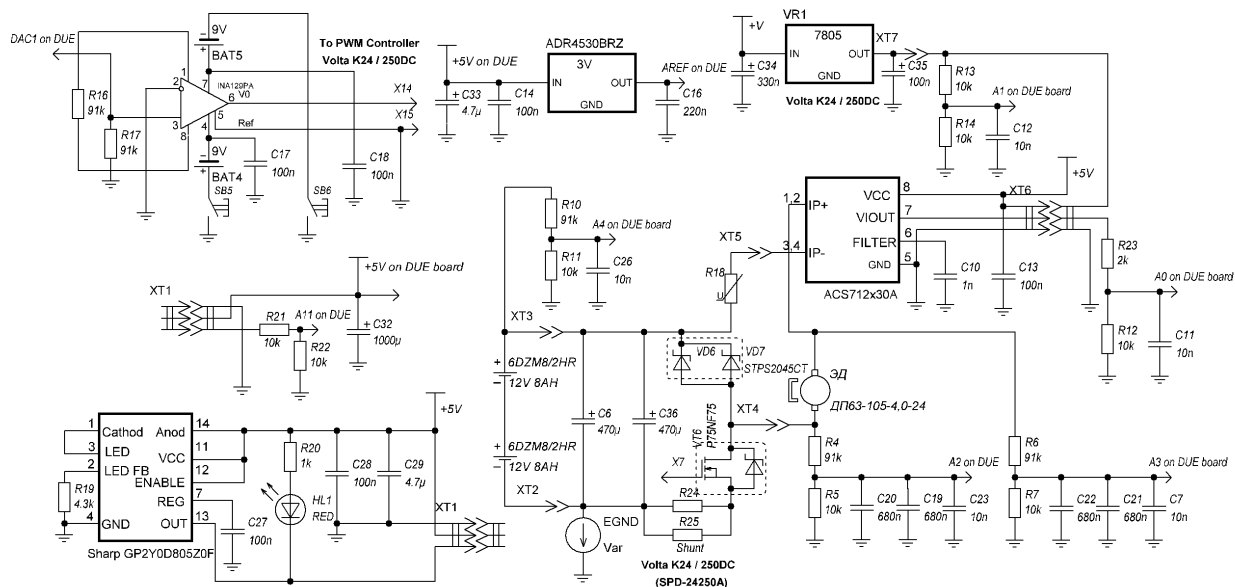


Рис. 1. Электрическая схема принципиальная подключения основных компонентов модуля управления модели насосной установки сухого дока

Контроллер Arduino DUE имеет аналоговые входы и выходы с достаточно высоким разрешением 12 бит. Однако для точных измерений и генерации сигналов с таким разрешением необходимо использовать внешний источник опорного напряжения, поскольку в штатном варианте оно формируется стабилизатором, установленным на плате и имеющим значительную ошибку регулирования напряжения на выходе. В качестве внешнего источника опорного напряжения на стенде применена микросхема ADR4530BRZ - сверхнизкошумящий, высокоточный источник опорного напряжения с номинальным напряжением на выходе 3,000 В и с наибольшей начальной ошибкой  $\pm 0,02\%$  [13].

Диапазон измеряемых и генерируемых напряжений на аналоговых входах и выходах контроллера Arduino DUE неодинаковый, 16-канальный АЦП измеряет напряжения в диапазоне 0...3,000 В, а 2-канальный ЦАП может выдавать напряжения в диапазоне  $(1/6...5/6) \cdot 3,000 В$  [12]. В связи с последним обстоятельством пришлось для согласования напряжения на выходе ЦАП и напряжения управления Volta k24/250DC установить усилитель напряжения, в качестве которого применен прецизионный инструментальный операционный усилитель INA129РА с низким потреблением энергии [14]. Для отображения некоторых результатов измерений и результатов обработки этих измерений контроллером на стенде имеется TFT-дисплей с диагональю 1,77" и разрешением 160×128 точек Arduino LCD Screen [15].

Схема его подключения к DUE на рис. 1 не приведена, но она есть на сайте разработчика. Для измерения тока якоря электродвигателя ДП63-105-4-24 используется аналоговый датчик тока на эффекте Холла ACS712х30А, обеспечивающий гальваническую развязку силовой цепи, характеризующийся достаточно высоким быстродействием и точностью [16]. Он включен в силовую цепь таким образом, что протекание тока вызывает снижение напряжения на его выходе относительно напряжения при нулевом значении тока. Датчик получает питание с выхода +5 В контроллера Volta k24/250DC, который был предназначен в штатном варианте для питания датчика Холла SS49Е. Напряжение на этом выходе, как показали измерения, характеризуется низким уровнем шума и подвержено относительно медленному дрейфу в отличие от выхода питания +5 В на контроллере Arduino DUE, используемого для питания дисплея, датчика уровня и источника опорного напряжения. Поскольку чувствительность и напряжение при нулевом

значении тока являются величинами, которые зависят от напряжения питания датчика, то для компенсации этого влияния при обработке результатов измерений также осуществляется контроль напряжения питания датчика тока, которое через резистивный делитель подается на соответствующий аналоговый вход Arduino.

Для контроля достижения конечного значения уровнем жидкости в верхней части наливной трубы смонтирован инфракрасный датчик расстояния с логическим выходом Sharp GP2Y0D805Z0F, который реагирует на перекрытие просвета в пазу, пропиленном в торцевой части трубы [17]. Перекрытие просвета паза происходит за счет подъема стакана-поплавка, увлекаемого жидкостью при возрастании ее уровня выше некоторого значения. Сигнал с выхода датчика поступает через соответствующий делитель на один из входов контроллера. Достоинством этого датчика является достаточно малое время отклика.

Для измерения напряжения аккумуляторной батареи имеется еще один делитель, средняя точка которого подключена к соответствующему аналоговому входу контроллера. Для измерения среднего напряжения, подаваемого на якорь двигателя, на стенде есть два делителя напряжения, на выходы которых подключены конденсаторы с емкостью, достаточной для того, чтобы пульсации напряжения, измеряемого АЦП DUE, были практически устранены. Делители подключены к клеммам двигателя и измеряют напряжение по отношению к точке, совмещенной с землей напряжения задания Volta k24/250DC. Собственно напряжение питания двигателя подсчитывается путем вычитания из напряжения, измеряемого на положительной клемме, напряжения, которое измеряется на отрицательной его клемме, программно.

Для калибровки всех каналов измерения напряжений применялся высокоточный мультиметр UTM139E, который позволяет измерять постоянные и пульсирующие напряжения с точностью 0,05 %.

Особенностью преобразователя Volta k24/250DC, как показали измерения, является то, что во время работы имеется некоторое падение напряжения между отрицательным полюсом батареи и землей напряжения задания, что условно учитывается на схеме рис. 1 введением дополнительной ЭДС  $E_{GND}$ , кроме того при токе нагрузки порядка нескольких ампер и выше возникает заметное падение напряжения между положительным полюсом батареи и положительной клеммой двигателя, что учитывается сопротивлением  $R_{18}$ .

### 2.3. Следящая система автоматического управления напряжением питания двигателя электронасоса.

Как известно напряжение на клеммах свинцово-кислотной аккумуляторной батареи в процессе ее работы падает вследствие разряда и колебаний нагрузки. Напряжение одного полностью заряженного аккумулятора на холостом ходу составляет приблизительно 12,8 В, а напряжение холостого хода разряженного аккумулятора к моменту окончания работы стенда равно примерно 12,2 В. Минимально допустимое напряжение разряда аккумуляторной батареи ограничено напряжением отсечки защиты от глубокого разряда, встроенной в контроллер Volta k24/250DC, и равно 21 В. Кроме того элементы силовой цепи – полевой транзистор P75NF75 и токоизмерительный шунт блока токоограничения контроллера, – тоже характеризуются некоторым падением напряжения, зависящим от величины протекающего тока. Как следствие, напряжение питания двигателя при фиксированном максимальном значении напряжения задания контроллера, а значит, и скважности, в наименее благоприятных условиях работы стенда может изменяться в пределах 22,8...25.6 В. То есть по отношению к максимальному значению в процессе разряда, а также под действием тока нагрузки напряжение может уменьшиться почти на 11 %. Поэтому, если при отработке заданной программы управления электронасосом изменять скважность импульсов, считая напряжение источника неизменным, то возникающие в действительности колебания напряжения на его выходе могут привести к существенному искажению желаемой формы напряжения питания двигателя.

Для исключения влияния падения напряжения на клеммах аккумуляторной батареи и элементах силовой цепи преобразователя на среднее значение напряжения питания двигателя необходимо дополнить программу управления следящей системой. Для этого следует охватить широтно-импульсный преобразователь отрицательной обратной связью по величине среднего

напряжения питания двигателя и ввести в цепь прямого тракта системы пропорционально-интегральный регулятор. Функциональная схема следящей системы изображена на рис. 1. Регулятор нужен для компенсации влияния постоянной времени фильтра, установленного в каналах измерения напряжений на клеммах двигателя, а также для устранения статической и скоростной ошибки [18]. Покажем, как рассчитать параметры регулятора.

Если пренебречь запаздыванием широтно-импульсного преобразователя, дискретностью по уровню и по времени контроллера Arduino Due, то в цепи прямого тракта будем иметь ПИ-звено, описывающее регулятор напряжения, и пропорциональное звено, описывающее преобразователь, а в цепи обратной связи будем иметь инерционное звено, которое описывает фильтр (считаем, что оба фильтра на рис. 1 имеют одинаковую постоянную времени). Передаточные функции этих звеньев следующие:

$$H_c(p) = \frac{y_c(p)}{u_r(p) - u_t(p)} = \frac{T_f p + 1}{T_i p}; \quad (1)$$

$$H_{vc}(p) = k_{vc} = u_s \gamma(p) / y_c(p); \quad (2)$$

$$H_t(p) = u_t(p) / u_m(p) = 1 / (T_t p + 1). \quad (3)$$

Подсчитаем значение коэффициента усиления  $k_{vc}$ . Для этого сначала запишем выражение, связывающее цифровое значение сигнала на выходе регулятора с напряжением на выходе ЦАП

$$u_c = 0,5 + \frac{2,5 - 0,5}{4095} y_c. \quad (4)$$

Напряжение задания Volta k24/250DC равно

$$u_{vcr} = (1 + 49,4 / 91,0) u_c. \quad (5)$$

Скважность связана с напряжением задания выражением

$$\gamma = \frac{u_{vcr} - 1,265}{3,850 - 1,265}. \quad (6)$$

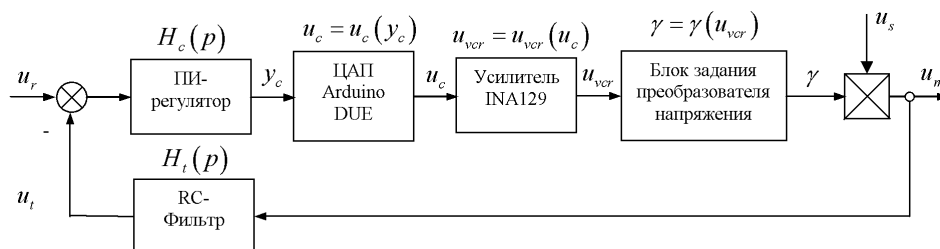


Рис. 2. Функциональная схема следящей системы автоматического управления напряжением питания двигателя электронасоса

Если (4) подставить в (5), а затем (5) в (6), то получим формулу

$$\gamma = 2,91502 \cdot 10^{-4} y_c - 1,90937 \cdot 10^{-1}, \quad (7)$$

из которой следует, что при наименьшем напряжении источника 22,8 В минимальный коэффициент усиления широтно-импульсного преобразователя будет составлять

$$k_{vc\min} = k_\gamma u_{s\min}, \quad (8)$$

$k_{vc} = 22,8 \cdot 2,91502 \cdot 10^{-4} = 6,64625 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot \text{кВ}^{-1}$ , а максимальный коэффициент усиления, соответствующий наибольшему напряжению источника 25,6 В, будет равен

$$k_{vc\max} = k_\gamma u_{s\max}, \quad (9)$$

$$k_{vc} = 25,6 \cdot 2,91502 \cdot 10^{-4} = 7,46245 \cdot 10^{-3} \text{ В} / \text{кВ}.$$

Найдем номинальную постоянную времени фильтра

$$T_i = C_f R r / (R + r) = C_f R_c, \quad (10)$$

$$T_i = (2 \cdot 680 + 10) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{91 \cdot 10}{91 + 10} = 12,3436 \text{ мс}.$$

Передаточная функция замкнутой системы по заданию

$$H(p) = \frac{u_m(p)}{u_r(p)} = \frac{T_f p + 1}{\frac{T_i}{k_{vc}} p + \frac{T_f p + 1}{T_i p + 1}}. \quad (11)$$

Анализируя (11), нетрудно видеть, что следящая система будет работать без ошибки, когда  $T_f = T_i$  и  $T_i = k_{vc} T_f$ . Однако на практике невозможно определить постоянную времени фильтра абсолютно точно, поскольку истинные значения емкости и сопротивлений по установленным производителями допускам могут отличаться от паспортных, а самостоятельное измерение этих величин тоже характеризуется определенной погрешностью. Кроме того коэффициент усиления  $k_{vc}$  претерпевает изменение в процессе работы, поскольку изменяется напряжение источника. В этой связи оценим значение скоростной ошибки по заданию, полагая, что реальные параметры фильтра и преобразователя не равны тем значениям, которые заложены в расчет постоянных

времени регулятора. Передаточная функция системы для погрешности по заданию имеет вид

$$H_\Delta(p) = \frac{u_r(p) - u_m(p)}{u_r(p)} = 1 - H(p). \quad (12)$$

Отметим, что искать коэффициент скоростной ошибки системы по возмущению нет смысла, если возмущение имеет постоянный характер (константа в правой части формулы (7)). Можно показать, что статической ошибки по возмущению в рассматриваемой системе тоже нет [18]. Подставив (11) в (12) и несколько преобразовав, получим передаточную функцию

$$H(p) = 1 - \frac{1}{\frac{T_i}{k_{vc} T_f} - \frac{T_i}{k_{vc} T_f} \frac{1}{T_f p + 1} + \frac{1}{T_i p + 1}}. \quad (13)$$

Ее первая производная по параметру  $p$

$$\frac{dH}{dp} = \frac{\frac{T_i}{k_{vc}} \frac{1}{(T_f p + 1)^2} - \frac{T_i}{(T_i p + 1)^2}}{\left( \frac{T_i}{k_{vc} T_f} - \frac{T_i}{k_{vc} T_f} \frac{1}{T_f p + 1} + \frac{1}{T_i p + 1} \right)^2}. \quad (14)$$

Если (13) разложить в окрестности точки  $p = 0$  в ряд Маклорена, то изображение по Лапласу погрешности по заданию запишется так

$$\Delta u_m(p) = \left( H(0) + \frac{1}{1!} \frac{dH}{dp} \Big|_{p=0} p + \dots \right) u_r(p), \quad (15)$$

а оригинал будет

$$\Delta u_m(t) = H(0) u_r(t) + \frac{1}{1!} \frac{dH}{dp} \Big|_{p=0} \frac{du_r}{dt} + \dots \quad (16)$$

При линейном сигнале задания  $u_r = at$  формула (16) упрощается

$$\Delta u_m(t) = H(0) at + a \frac{dH}{dp} \Big|_{p=0}. \quad (17)$$

Очевидно, что  $H(0) = 0$ , поэтому остается найти коэффициент скоростной ошибки, подставив  $p = 0$  в (14),

$$S = H'(0) = T_i / k_{vc} - T_t, \quad (18)$$

тогда

$$\Delta u_m(t) = a(T_i / k_{vc} - T_t) = const. \quad (19)$$

Из последнего видно, что скоростная ошибка является постоянной величиной и при фиксированных значениях  $k_{vc}$  и  $T_t$  зависит только от постоянной времени интегрирующего звена  $T_i$ . Если же считать значение  $T_i$  постоянным, то наименьшую скоростную ошибку будем иметь при  $k_{vc} = k_{vcmax}$  и  $T_t = T_{tmax}$ , а наибольшую при  $k_{vc} = k_{vcmin}$  и  $T_t = T_{tmin}$ . Наибольшую в смысле абсолютного значения скоростную ошибку получим при максимальном темпе нарастания напряжения задания  $a = a_{max}$ .

Представляет интерес оценка скоростной ошибки в случае, когда параметры элементов фильтра соответствуют нижним и верхним границам допусков на измерение мультиметром UTM139E, то есть когда сопротивления делителя и емкость конденсатора имеют минимальное и максимальное значение. На стенде применены резисторы с заводским допуском  $\pm 5\%$ , а конденсаторы с диэлектриком класса X7R имеют допуск  $\pm 10\%$  [19]. Мультиметр обеспечивает измерение сопротивлений с точностью  $\pm 0,3\%$  и емкости  $\pm 4\%$ . Опуская подробный расчет, приведем результаты в форме табл. 1, 2. Следует обратить внимание на то, что эквивалентное сопротивление параллельно соединенных резисторов  $R$  и  $r$  будет иметь минимальное значение при минимальных значениях сопротивления этих резисторов, а максимальное значение получится,

напротив, при максимальных  $R$  и  $r$ , что следует из формулы для расчета эквивалентного сопротивления, если записать ее в виде

$$R_e = \frac{1}{1/R + 1/r}. \quad (20)$$

Таким образом, беря минимальные и максимальные значения сопротивления  $R_e$  и емкости  $C$ , получим границы изменения постоянной времени фильтра. При расчете параметров ПИ-регулятора значение коэффициента усиления преобразователя определено, как среднее арифметическое предельных значений, то есть

$$k_{вном} = (k_{vcmin} + k_{vcmax}) / 2. \quad (21)$$

Предельный темп нарастания напряжения принят 44 В/с. Характерно, что, максимальная скоростная ошибка получается положительная, тогда как минимальное значение этой величины отрицательно. В частности, это значит, что напряжение на выходе системы будет опережать задающий сигнал, когда коэффициент усиления источника напряжения выше номинального (среднего) значения и отставать от него, если коэффициент усиления источника напряжения будет меньше, чем номинальный. Коэффициенты скоростной ошибки  $S_1$  и  $S_2$ , а также значения самой ошибки  $\Delta u_{m1}$  и  $\Delta u_{m2}$  подсчитаны для двух вариантов, когда она возникает вследствие отклонения параметров фильтра от номинальных значений и в результате изменения коэффициента усиления источника, и, когда на нее оказывает влияние только последний фактор. Во втором случае ошибка меньше почти в два раза. Но даже с учетом отклонения параметров фильтра значение ошибки, которое по абсолютной величине

Таблица 1.

К определению скоростной ошибки следящей системы

Значение	C, нФ	r, кОм	R, кОм	R <sub>e</sub> , кОм	T <sub>i</sub> , мс	U <sub>s</sub> , В
Мин.	1315.20	9.97000	90.7270	8.98287	11.8143	22.8000
Ном.	1370.00	10.0000	91.0000	9.00990	12.3436	24.2000
Макс.	1424.80	10.0300	91.2730	9.03693	12.8758	25.6000

Таблица 2.

Скоростная ошибка следящей системы

$k_\gamma$ , кВ <sup>-1</sup>	$k_{vc}$ , В/кВ	$T_f$ , мс	$T_i$ , мсВ/кВ	$a$ , В/с	$S_1$ , мс	$\Delta u_{m1}$ , мВ	$S_2$ , мс	$\Delta u_{m2}$ , мВ
2.91502E-04	6.64625E-03	12.3436	8.70758E-02	44.0000	1.28723	57	0.757938	33
2.91502E-04	7.05435E-03	12.3436	8.70758E-02	44.0000	0.00000	0	0.000000	0
2.91502E-04	7.46245E-03	12.3436	8.70758E-02	44.0000	-1.20729	-53	-0.675039	-30

не превосходит 60 мВ, лежит в пределах, допустимых для решения поставленной задачи управления электронасосом физической модели насосной установки сухого дока. Также можно отметить, что если не выполнять измерение параметров компонентов фильтра посредством мультиметра, то возможная скоростная ошибка становится больше, чем  $\Delta u_{m1}$  почти вдвое.

Укажем, что непосредственное измерение скоростной ошибки выходной координаты системы вызывает некоторые затруднения, но сравнительно легко поддается измерению скоростная ошибка на выходе фильтра. Можно показать, что она равна

$$\Delta u_t(t) = aT_i / k_{vc} = const, \quad (22)$$

поэтому фактическая скоростная ошибка для напряжения питания двигателя по заданию может быть найдена, как

$$\Delta u_m = aT_i / k_{vc} - aT_t = \Delta u_t - aT_t, \quad (23)$$

но при этом необходимо предварительно с высокой точностью определить постоянную времени фильтра  $T_t$ . Интересно, что в рассматриваемой системе скоростная ошибка по заданию напряжения на выходе фильтра имеется всегда, хотя ошибка выходной координаты системы при номинальном коэффициенте усиления источника и точно известной постоянной времени фильтра может быть равна нулю.

### 3. Работа с физической моделью насосной установки сухого дока. Программа.

#### 3.1. Оптимизация переходного процесса модели насосной установки сухого дока при работе с постоянным напряжением питания электронасоса. Критическое напряжение.

Поскольку на доковых насосных станциях, как правило, повсеместно используются нерегулируемые электроприводы главных насосов, то целесообразно, прежде всего, обеспечить возможность работы физической модели насосной установки с постоянным напряжением питания двигателя электронасоса. При этом следует с целью ограничения тока якоря двигателя с одной стороны и скоростной ошибки с другой ограничить темп нарастания напряжения питания двигателя некоторым максимальным значением, то есть ввести во временную диаграмму изменения напряжения питания двигателя наклонный участок. Поскольку на разработанном стенде протяженность этого участка можно сделать достаточно малой, выдержав требования по предельному

значению скоростной ошибки и пикового значения тока якоря двигателя, то рабочий режим может с достаточной степенью точности считаться режимом работы с постоянным напряжением. Рабочее напряжение питания двигателя также ограничено. Принятое на стенде предельное значение напряжения питания двигателя меньше номинального, поскольку на этом уровне его невозможно стабилизировать вследствие падения напряжения в элементах силовой цепи. Для обеспечения запаса по напряжению источника с учетом его падения при разряде аккумуляторной батареи предельное напряжение питания двигателя составляет 22 В. Предельный темп его нарастания соответствует изменению от нуля до максимума за 0,5 с.

Полагая, что режим работы электронасоса с постоянным напряжением питания не является оптимальным, следует в конечном итоге оптимизировать программу управления напряжением питания двигателя и сравнить потребление энергии в двух случаях, когда заданный уровень жидкости достигается в требуемый момент времени при постоянном напряжении и когда он достигается в тот же момент времени, но уже при оптимальном управлении. При этом следует задать время переходного процесса. Выберем это время так, чтобы переходный процесс при работе с постоянным напряжением питания электронасоса характеризовался наименьшим потреблением энергии. Для нахождения указанного момента времени удобно, задаваясь рядом рабочих напряжений, которые принадлежат некоторому интервалу, измерить для каждого из них время достижения заданного уровня жидкости, а также подсчитать потребляемую энергию по формуле

$$E = \int_0^T u_r(t) i(t) dt \approx \sum_{k=1}^{k=m} u_{rk} i_k \Delta t_k, \quad (24)$$

после чего выбрать то значение напряжения питания двигателя, при котором потребляемая энергия достигла своего минимума. В качестве верхней границы оговоренного интервала целесообразно принять максимально возможное напряжение питания двигателя, а в качестве нижней границы желательно взять значение напряжения, которое несколько превышает критическое. Будем называть критическим напряжением такое значение напряжения питания двигателя электронасоса, при котором установившееся значение уровня жидкости оказывается строго равно заданному значению. Подчеркнем, что если напряжение питания электронасоса будет меньше критического, то заданный уровень жидкости вообще будет недостижим, а если оно бу-



дет строго равно критическому значению, то теоретически переходный процесс будет длиться бесконечно долго. На практике установить критическое напряжение можно лишь с некоторой степенью точности, найдя такой узкий интервал изменения напряжения питания двигателя, что при его максимуме процесс будет длиться достаточно долго, но все же датчик уровня сработает, а при его минимуме срабатывание датчика не будет происходить в течение весьма длительного периода времени. Критическое напряжение может несколько изменяться в зависимости от различных факторов, таких как нагрев обмотки якоря двигателя, отклонение первоначального уровня жидкости при повторных заливках системы, время отклика датчика уровня, колебания суммарного момента трения щеток по поверхности ламелей коллектора, а также в подшипниках и сальнике насоса. Вот почему задавать нижнюю границу интервала поиска оптимального рабочего напряжения следует с некоторым запасом в большую сторону. Шаг изменения рабочего напряжения можно принять одинаковым.

Для получения описанной выше зависимости потребляемой энергии от времени переходного процесса была написана программа в среде Arduino IDE, которая реализует технологический процесс с последовательным изменением рабочего напряжения в установленных пределах и с заданным шагом. Программа состоит из двух основных блоков, первый из которых реализует управление электронасосом по заданной диаграмме изменения напряжения с применением следящей системы, а также измерение сигналов датчиков, пересчет в интересующие физические величины, подсчет потребляемой энергии, а второй используется для передачи информации на компьютер по последовательному порту и вывод показаний на дисплей. Одновременно с этим второй программный блок осуществляет задержку перед очередным запуском системы, которая нужна для затухания колебаний уровня жидкости, всегда наступающих после отключения электропривода насоса.

На рис. 3, 4 показан фрагмент диаграммы напряжения, иллюстрирующий, как с течением времени изменяется заданное напряжение питания двигателя и напряжение на выходе фильтра, а на рис. 5 показаны экспериментальные энергетические характеристики, которые были сняты на стенде с небольшими промежуточными паузами. График на рис. 3, 4 соответствует рабочему напряжению питания электронасоса, при котором достигается минимальное потребление энергии.

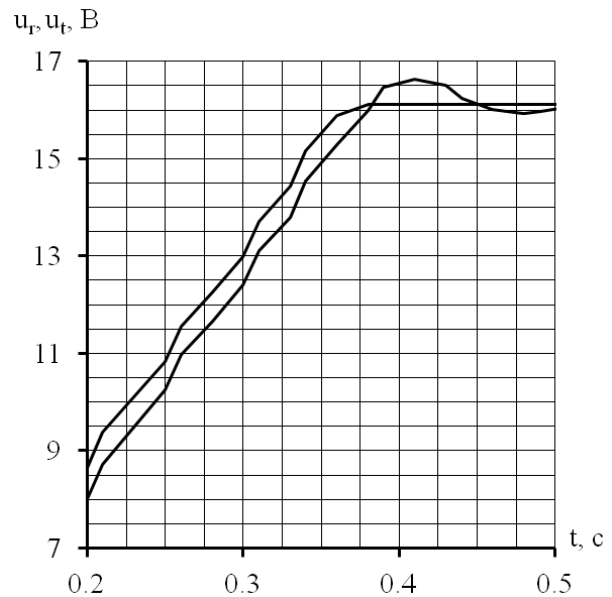


Рис. 3 Фрагмент диаграммы заданного напряжения и напряжения на выходе фильтра при работе с оптимальным постоянным напряжением (к определению скоростной ошибки)

По графику рис. 3 можно судить о том, что скоростная ошибка следящей системы находится на допустимом уровне. Ее значение можно подсчитать, воспользовавшись формулой (23), если подставить предельное значение темпа нарастания напряжения  $a_{\max} = 44 \text{ B/c}$  и постоянной времени, вычисленной с помощью (10).

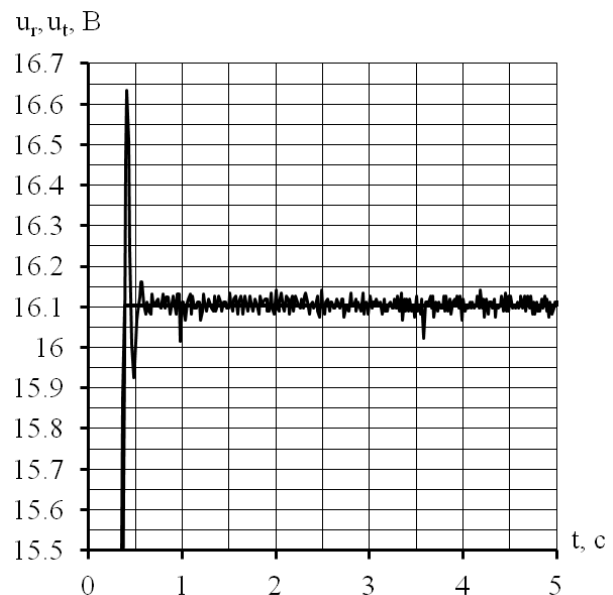


Рис. 4 Фрагмент диаграммы заданного напряжения и напряжения на выходе фильтра при работе с оптимальным постоянным напряжением (квазиустановившийся режим)

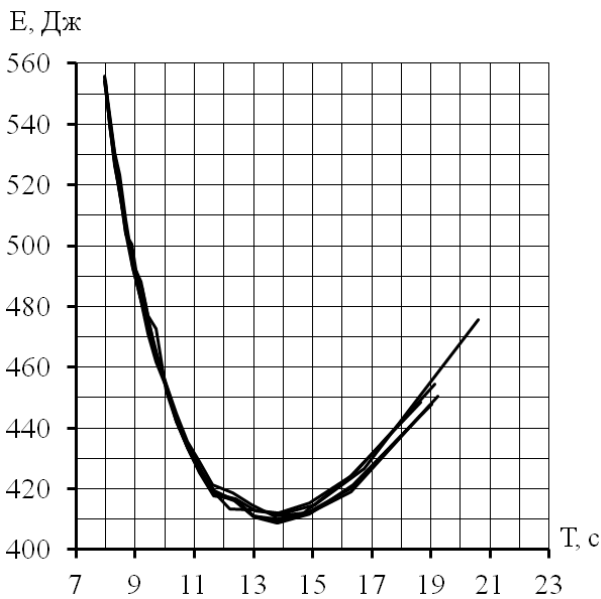


Рис. 5 Зависимость потребляемой энергии от времени переходного процесса при постоянном напряжении питания электронасоса

На рис. 4 видно, что напряжение на выходе фильтра в квазиустановившемся режиме имеет колебательный характер вследствие дискретности системы по уровню и по времени, а также действия случайных помех. Но амплитуду этих колебаний можно считать допустимой в рамках решения рассматриваемой задачи. Также в момент начала стабилизации напряжения питания двигателя возникает перерегулирование по напряжению на выходе фильтра, которое не превышает 4%. Необходимо отметить, что на рис. 5 одна характеристика проходит заметно выше остальных пяти. Она при данном времени переходного процесса выражает наибольшее энергопотребление и снималась на стенде первой. Начиная со второй характеристики, смещения последующих характеристик наблюдалось в значительно меньшей степени и поэтому пять других характеристик проходят достаточно близко. Среди числа возможных причин смещения характеристик рис. 5 можно назвать вязкое трение в подшипниках двигателя и в сальнике насоса, а также трение щеточно-коллекторного узла двигателя, который специально не подвергался обкатке до момента начала проведения стендовых испытаний. По-видимому, при первых включениях трение оказывается заметно выше, чем после работы в течение некоторого промежутка времени. Также можно было бы предположить, что смещение характеристик – это результат возрастания активного сопротивления обмотки якоря вследствие нагрева. Но при увеличении сопротивления время переходного процесса должно затягиваться, а в действительности прослежи-

вается обратная тенденция, то есть время переходного процесса для одного и того же закона управления напряжением питания двигателя сокращается при повторном снятии характеристики. То же самое касается потребляемой энергии.

### 3.2. Оптимизация переходного процесса модели насосной установки сухого дока при кусочно-линейном законе изменения напряжения питания электронасоса. Критический наклон диаграммы напряжения.

В работах [1, 2] показано, что оптимальный закон управления частотой вращения рабочего колеса насоса, который обеспечивает опорожнение камеры сухого дока за установленное время с минимальным потреблением энергии, предполагает изменение частоты вращения от некоторого начального значения до некоторого конечного значения в монотонно возрастающей функции времени. Поэтому начальное значение частоты вращения в процессе управления оказывается минимальным, а конечное значение – максимальным. Характерно, что такие монотонно возрастающие функции – экстремали достаточно близки к линейным [1, 2]. На физической модели управление осуществляется не частотой вращения электронасоса напрямую, а напряжением его питания, которое ограничено снизу минимальным значением скважности, а сверху, как и прежде – предельно допустимым значением 22 В. Кроме того темп нарастания напряжения ограничен, как раньше, по условиям допустимого пикового значения тока якоря двигателя и скоростной ошибки напряжения. Предположим, что в классе неубывающих кусочно-линейных функций существует такая функция изменения напряжения во времени, которая при заданной длительности переходного процесса и граничных условиях обеспечивает минимум потребления энергии электронасосом и притом получаемое значение энергии будет меньше, чем при постоянном оптимальном напряжении питания двигателя. В общем случае график такой функции может состоять из трех участков. На первом участке наклон предельно допустимый максимальный, а начальное значение напряжения – нулевое. На втором участке наклон – меньше максимально допустимого значения, а условное начальное значение – ненулевое. На третьем участке наклон отсутствует и поддерживается максимально допустимое напряжение питания двигателя электронасоса. В частном случае наклон на втором участке может отсутствовать, и тогда до момента окончания переходного процесса будет поддерживаться условное начальное напряжение второго участка. В другом частном случае начальное

напряжение второго участка может равняться нулю, тогда наклон диаграммы должен или быть равным предельно допустимому или быть меньше его. Для того чтобы задать конкретную функцию, принадлежащую рассматриваемому классу, достаточно указать начальное значение напряжения и наклон второго участка диаграммы. Поэтому задача оптимизации по существу сводится к разысканию двух неизвестных. Если задаться некоторым наклоном, то решив вспомогательную краевую задачу можно найти начальное значение напряжения [20]. При этом с требуемой точностью будут удовлетворены граничные условия, и окажется известно значение потребляемой энергии. Произведя перебор ряда значений наклона в заранее известных границах с некоторым шагом, можно найти соответствующие начальные значения напряжения и потребляемой энергии, а затем построить характеристику, которая выражает зависимость между энергией и наклоном, а также начальным напряжением и наклоном. По этой характеристике можно с некоторым приближением подсчитать оптимальное значение наклона и узнать оптимальное начальное напряжение. Однако следует иметь в виду, что при достаточно больших значениях времени переходного процесса наклон диаграммы напряжения нельзя задавать больше некоторого критического значения, иначе краевая задача теряет смысл. Будем называть критическим наклоном диаграммы напряжения такой наклон, при котором заданное время переходного процесса достигается с нулевым начальным значением напряжения питания электронасоса. Очевидно, что при наклонах больших критического, но меньших предельно допустимого, время переходного процесса окажется меньше желаемого значения и решение вспомогательной краевой задачи получить будет невозможно, а при меньших наклонах краевая задача становится разрешима на некотором интервале изменения начального напряжения.

**Замечание.** Получив решение задачи оптимизации описанным способом, нужно еще проверить, является ли этот экстремум абсолютным, поскольку, в общем случае может существовать оптимальное время переходного процесса, когда обеспечивается абсолютный минимум потребляемой энергии. Это означает, что если длительность переходного процесса превышает оптимальное время, то закон оптимального управления следует дополнить этапом задержки включения электронасоса, величина которой определяется разностью заданного и оптимального времени. Тогда программа управления будет совпадать с программой управления при отработке

оптимального времени, но ей будет предшествовать соответствующая пауза.

Построение вышеописанных энергетических характеристик с помощью физической модели реализовано программно. Программа построения характеристики имеет много общего с предыдущим вариантом, но в данном случае наряду с вышеперечисленными функциями реализован алгоритм решения краевой задачи. Краевая задача решается непосредственно на физической модели при каждом фиксированном значении наклона путем последовательных приближений, а именно - деления пополам отрезка первоначального приближения искомой величины. При этом переходный процесс осуществляется с начальным напряжением, которое равно среднему арифметическому граничных значений интервала начального приближения. Его завершение путем отключения двигателя электронасоса от источника выполняется в одном из двух случаев: 1. если сработал датчик уровня; 2. если длительность переходного процесса превысила в  $k > 1$  раз заданное время процесса. Таким образом, если измеренное время процесса больше, чем заданное, то меньшая граница интервала подменяется средним, а если оно оказалось, напротив, меньше заданного, то средним подменяется большая граница. Перед решением краевой задачи с очередным значением наклона на первой итерации всегда выполняется запуск электронасоса с предельным постоянным напряжением. Это сделано для того, чтобы оценить влияние нагрева обмотки якоря двигателя на получаемые характеристики и удостовериться в повторяемости результатов эксперимента. На этой итерации измеряется время переходного процесса  $T_1$  и подсчитывается количество потребляемой энергии  $E_1$ . При максимальном напряжении питания электронасоса получается наибольшее потребление энергии, как это следует из графика рис. 5. Поэтому возникающие отклонения величины потребляемой энергии вследствие изменения сопротивления обмотки якоря в этом случае должны быть наиболее заметны. Также при максимальном напряжении питания снижается влияние спонтанных изменений момента трения в механической части. Прекращение итерационного процесса происходит в одном из трех случаев: 1. заданное время переходного процесса находится вне промежутка  $[T_3; T_2]$ , соответствующего интервалу первого приближения начального значения напряжения питания электронасоса  $[u_{r\,init\,min}; u_{r\,init\,max}]$ ; 2. абсолютная ошибка определения времени переходного

го процесса уже не превышает заданного значения, то есть  $|T_i - T_{ps}| \leq \varepsilon$ ; 3. число итераций равняется или превышает установленное значение, то есть  $i \geq n$ .

Во время экспериментов было замечено, что погрешность итерационного процесса, начиная с некоторого номера итерации, может начать расти и поэтому на последней итерации можно получить меньшую точность, чем при  $i < n$ . Для учета этого обстоятельства в том случае, когда не удается выполнить условие  $|T_i - T_{ps}| \leq \varepsilon$  за установленное число итераций  $n$ , алгоритм работы программы управления предусматривает отбор результата с наименьшей погрешностью  $\varepsilon_{\min} > \varepsilon$ . Причина нарушения сходимости итерационного процесса может быть связана с влиянием случайных помех, дискретности системы управления, трения в механической части электропривода. Однако, несмотря на невозможность получения заданной точности в отдельных случаях (при каких-то значениях наклона), реально достижимая степень точности может считаться приемлемой для решения поставленной задачи.

При формировании интервалов первого приближения начального значения напряжения питания электронасоса применяются формулы

$$u_{r\,init\,min} = \max(0, k_{\Delta} u_{rc} - a T_{ps}), \quad (25)$$

$$u_{r\,init\,max} = (1 - a / a_{\max}) u_{r\,max}, \quad (26)$$

где  $k_{\Delta}$  – это коэффициент запаса, который принимается при  $a = 0$  больше единицы,  $k_{\Delta} > 1$ , а при  $a > 0$  меньше единицы,  $k_{\Delta} < 1$ ,  $u_{rc}$ ,  $u_{r\,max}$  – критическое и предельно допустимое максимальное значение напряжения,  $a$ ,  $a_{\max}$  – текущее и предельно допустимое максимальное значение темпа нарастания напряжения,  $T_{ps}$  – заданное время переходного процесса. Объясним, по каким соображениям минимальное напряжение вычисляется с применением формулы (25). Очевидно, что при линейно растущем напряжении питания двигателя заданный уровень жидкости не может достигаться, если напряжение питания двигателя меньше критического значения. Поэтому длительность переходного процесса не может быть меньше времени, за которое напряжение успевает измениться от своего начального значения до критического значения. Напротив, в силу инерционности системы, обусловленной наличием гидравлической емкости, длительность переходного процесса всегда будет превышать время достижения критического значения

напряжения. В результате можно в качестве минимального начального значения напряжения взять такое его значение, при котором за установленное время  $T_{ps}$  напряжение станет равно критическому значению  $u_{rc}$ . Тогда гарантированно время переходного процесса будет превышать заданное, что является обязательным требованием с точки зрения сходимости итерационного процесса, и вместе с тем удастся сузить интервал первого приближения искомой величины, особенно при малых наклонах. Однако в действительности в качестве нижней границы начального напряжения целесообразно принять несколько меньшее значение для того, чтобы исключить возможность наступления такого случая, когда  $T_2 < T_{ps}$  вследствие дрейфа критического напряжения. Это учитывается с помощью коэффициента  $k_{\Delta} < 1$ . Кроме того, при достаточно больших наклонах диаграммы напряжения можно получить отрицательное начальное значение напряжения  $u_{r\,init\,min} < 0$ , если воспользоваться формулой  $u_{r\,init\,min} = k_{\Delta} u_{rc} - a T_{ps}$ , что является некорректным. Это возможно, когда выполняется неравенство  $k_{\Delta} u_{rc} T_{ps}^{-1} < a < a_{cr}$ . Очевидно, что  $u_{rc} T_{ps}^{-1} < a_{cr}$ , следовательно,  $k_{\Delta} u_{rc} T_{ps}^{-1} < a_{cr}$ , что и свидетельствует о существовании таких наклонов  $a$ , при которых выполняется двойное неравенство. Поэтому в формулу (25) введена функция максимума, которая ограничивает начальное значение напряжения питания двигателя электронасоса на уровне нуля.

Проведя серию экспериментов на физической модели насосной установки сухого дока, удалось получить интересующие характеристики и диаграммы.

В результате обработки и анализа экспериментальных данных было установлено, что среднее время при тестовом запуске для двадцати точек составило 7,982 с, а среднее значение энергии 555,031 Дж. Наибольшее относительное отклонение от среднего значения для времени переходного процесса оказалось равно 0,370 %, а для величины энергии оно составило 0,342 %. Такие значения показателей позволяют сделать заключение о том, что температурные колебания сопротивления обмотки якоря двигателя электронасоса не вносят существенной погрешности в результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальная энергетическая характеристика, построенная на основании данных, собранных системой в процессе поиска оптималь-

ного наклона диаграммы напряжения, представлена на рис. 6.

Е, Дж

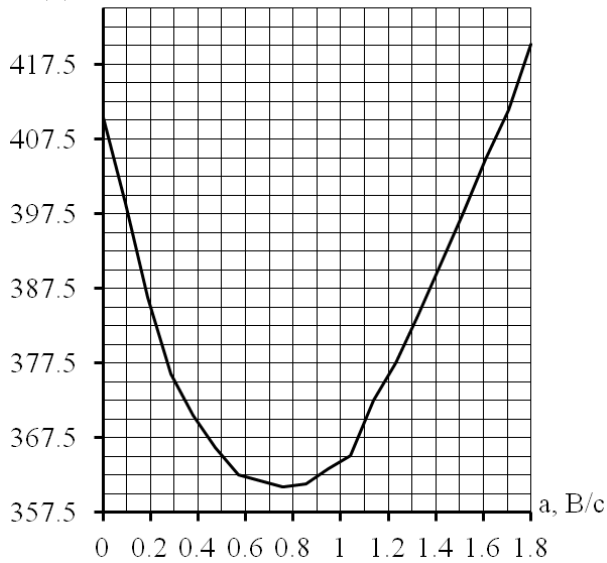


Рис. 6 Зависимость потребляемой энергии от наклона диаграммы напряжения

Из графика рис. 6 следует, что по сравнению с вариантом работы при постоянном напряжении в данном случае можно сократить потребление энергии примерно на 12 %.

На рис. 7 показано, какие были получены в результате численного решения краевой задачи времена переходного процесса при различных наклонах диаграммы напряжения.

Т, с

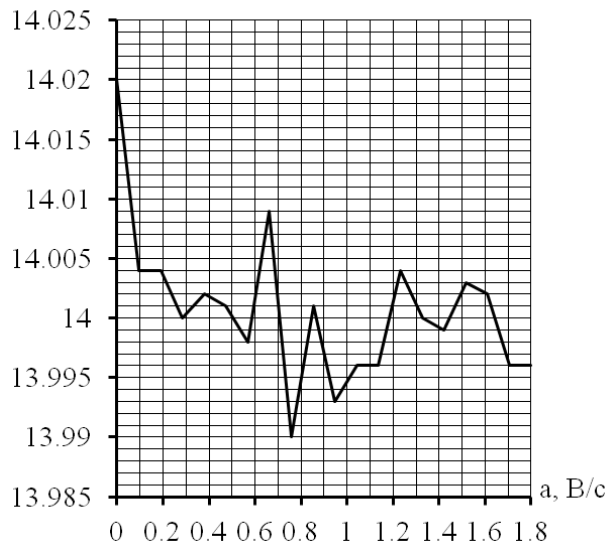


Рис. 7 Зависимость времени переходного процесса от наклона диаграммы напряжения

Из графика рис. 6 видно, что погрешность определения длительности переходного процесса достаточно мала для всех значений темпа нарастания напряжения. На рис. 8 показана заданная оп-

тимальная диаграмма напряжения питания электронасоса и диаграмма напряжения, сформированная на выходе фильтра, а также изменение с течением времени потребляемой энергии.

u, В; E,  
Дж/20

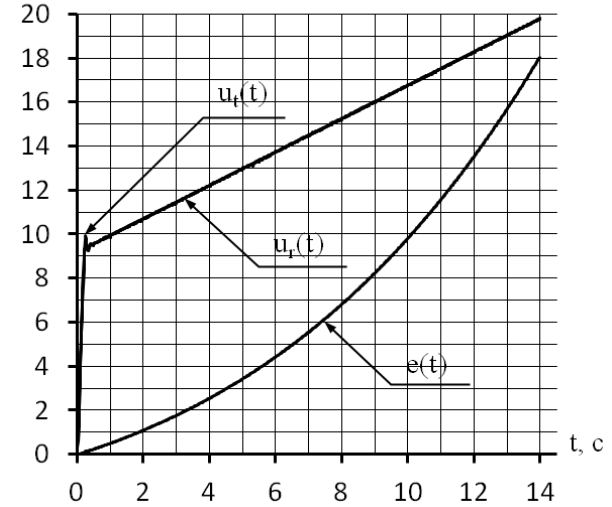


Рис. 8 Временные диаграммы напряжения и потребляемой энергии при оптимальном законе управления

Из графика на рис. 8 следует, что оптимальная диаграмма напряжения не содержит третий участок, то есть напряжение питания двигателя не достигает к моменту окончания процесса предельно допустимого значения.

На рис. 9 показана зависимость номера итерации, на которой была получена минимальная погрешность  $\varepsilon_{\min}$  от величины наклона.

i

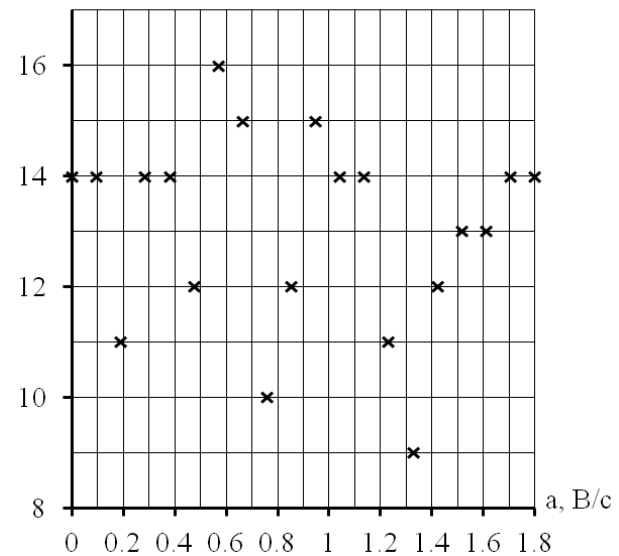


Рис. 9 Зависимость номера итерации с минимальной погрешностью от наклона диаграммы напряжения

На последнем рисунке видно, что наилучшее число итерации только при одном значении наклона оказалось равно предельно допустимому значению, что указывает на корректность выбора предельного числа итераций.

#### 4. Выводы

Сравнительный анализ закона управления напряжением питания электронасоса, который предполагает поддержание его постоянства и закона управления, найденного в классе неубывающих кусочно-линейных функций времени подтверждает целесообразность применения регулируемого электропривода. По сравнению с оптимальным переходным процессом при постоянном напряжении питания, когда установленный уровень жидкости достигается к заданному моменту времени с минимальным потреблением энергии, оптимальная кусочно-линейная диаграмма изменения напряжения питания двигателя насоса при том же времени переходного процесса обеспечивает выигрыш по количеству потребляемой энергии на уровне 10 %.

Математическое моделирование оптимальных режимов работы главных насосов реальной доковой насосной станции, произведенное в [1, 2], предсказывает меньшую величину экономии, чем значение, полученное на физической модели, что связано с применением на модели, в отличие от прототипа, электронасоса с относительно небольшой номинальной мощностью длительного установившегося режима работы.

При помощи физической модели насосной установки может быть построена энергетическая характеристика, позволяющая найти оптимальное время работы электронасоса, напряжение питания которого изменяется в кусочно-линейной функции времени. Однако при этом следует принимать во внимание затраты временных ресурсов, необходимых для решения задачи. Так, сбор данных для построения одной частной энергетической характеристики по двадцати точкам с приемлемой точностью решения вспомогательной краевой задачи, когда время переходного процесса является фиксированным, может составлять 7-8 часов вследствие большой общей длительности пауз, в течение которых происходит затухание остаточных колебаний уровня жидкости.

#### Список использованной литературы

1. Христо, П. Е. Энергосберегающее управление главными насосами сухого дока [Текст] / П. Е. Христо // Электротехнические и компьютерные системы. Издавецтво «Техніка». К.: 2015. Вып. № 19 (95). С. 154–159.
2. Христо, П. Е. Энергосберегающий электропривод главных насосов сухого дока на базе дифференциального каскада [Текст] / П. Е. Христо // Электротехнические и компьютерные системы. Издавецтво «Техніка». К.: 2016. Вып. № 22 (98). С. 200–210.
3. Григорьев, В. Н. Судоспускные и судоподъемные сооружения (проектирование и строительство) [Текст] / В. Н. Григорьев, Д. В. Марченко, Г. В. Симаков, В. А. Смелов // Л. Стройиздат, Ленингр. Отд.-ние, 1976, 176 с.
4. Герасимьяк, Р. П. Оптимальные системы управления электроприводов для студентов специальности 7.092203: Учеб пособие [Текст] / Р. П. Герасимьяк // Одесса: ОГПУ. 1998. 72 с.
5. Петров, Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления [Текст] / Ю. П. Петров // Л.: Энергия. – 1977. – 280 с.
6. ZUB Aquavent Circulation pumps U481 4 bis U4856 DE EN [Electronic Resource]. – Access Mode: [http://www.spheros.eu/Media/Documents/3523/ZUB\\_Aquavent\\_Umwaelzpumpen\\_DE\\_EN\\_2013\\_10.pdf](http://www.spheros.eu/Media/Documents/3523/ZUB_Aquavent_Umwaelzpumpen_DE_EN_2013_10.pdf)
7. Электровигатель постоянного тока ДП63-105-4,0-24 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lepse.com/products/160/4687/>
8. Азарх, Д. Н. Насосы. Каталог-справочник / Азарх Д.Н., под ред. С. П. Зеленова, А. И. Эйфеля. // Москва, Государственное научно-техническое издательство машиностроительной и судостроительной литературы, 1953. 428с.
9. Speed Controller SPD-24250A Installation and Wiring [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://www.electricscooterparts.com/hookup/SPD-24250A.htm>
10. SS49ELinear Hall Effect Sensor [Electronic Resource]. – Access Mode: [https://dscl.lcsr.jhu.edu/ma/in/images/3/31/SS49e\\_Hall\\_Sensor\\_Datasheet.pdf](https://dscl.lcsr.jhu.edu/ma/in/images/3/31/SS49e_Hall_Sensor_Datasheet.pdf)
11. 6DZM8 Factory Model CB10-12B [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://www.baacebattery.com/upload/2009829541599738.jpg>
12. Atmel-11057C-ATARM-SAM3X-SAM3A-Datasheet\_23-Mar-15 [Electronic Resource]. – Access Mode: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf)
13. ADR4520/ADR4525/ADR4530/ADR4533/ADR4540/ADR4550 Data Sheet [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://www.analog.com>
14. INA12x Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers [Electronic Resource]. – Access Mode: <http://www.ti.com>
15. SPECIFICATION FOR LCD MODULE MODULE NO.: HTF0177SN-01 DOC.REVISION

V1 [Electronic Resource]. – Access Mode: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/HTF0177SN-01-SPEC.pdf>

16. ACS712 Datasheet. [Electronic Resource]. – Access Mode [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)

17. GP2Y0D805Z0F Distance Measuring Sensor Unit Digital output (50 mm) type [Electronic Resource]. – Access Mode: [http://www.sharp.co.jp/products/device/doc/opto/gp2y0d805z\\_e.pdf](http://www.sharp.co.jp/products/device/doc/opto/gp2y0d805z_e.pdf)

18. Герасимьяк, Р. П. Повышение качества систем автоматического управления: Учеб. пособие [Текст] / Р. П. Герасимьяк // К. : УМК ВО. 1992. 100 с.

19. multilayer ceramic capacitorsepoxy.pdf [Electronic Resource]. – Access Mode: [https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/multilayer\\_ceramic\\_capacitorsepoxy.pdf](https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/multilayer_ceramic_capacitorsepoxy.pdf)

20. Моисеев, Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем [Текст] / Моисеев Н. Н. // М.: Наука. – 1971. – 424 с.

### References

1. Hristo, P. E. (2015), Energy-saving control of a dry dock dewatering pumps [Jenergosberegayuschee upravlenie glavnyimi nasosami suhogo doka]. Scientific and Technical Journal Electrotechnic and computer systems, Publishing house «Technique», с. Kyiv. no 19(95). pp. 154–159. (In Russian)

2. Hristo, P. E. (2016), Energy-saving electric drive of a drydock dewatering pumps based differential cascade [Jenergosberegajushhij jelektroprivod glavnyh nasosov suhogo doka na baze differentsial'nogo kaskada]. Scientific and Technical Journal Electrotechnic and computer systems, Publishing house «Technique», с. Kyiv. no 22 (98). pp. 200–210. (In Russian)

3. Grigor'ev, V. N., Marchenko, D. V., Simakov, G. V., Smelov, V. A. (1976), Ship-lowering and ship-raising facilities (design and construction) [Sudospusknye i sudopod#emnye sooruzhenija (proektirovanie i stroitel'stvo)]. L. Strojizdat, Leningrad branch, 176 p. (In Russian)

4. Gerasimjak, R. P. (1998), Optimum control system of electric drive for students of specialty 7.092203: Textbook [Optimal'nye sistemy upravlenija jelektroprivodov dlja studentov special'nosti 7.092203: Ucheb posobie]. Odessa: Odessa State Polytechnic University. 72 p. (In Russian)

5. Petrov, Ju. P. (1977), Variation methods of theory of optimal control [Variacionnye metody teorii optimal'nogo upravlenija]. L., Jenergija, 280 p. (In Russian)

6. ZUB Aquavent Circulation pumps U481 4 bis U4856 DE EN, available at: <http://www.spheros.eu/Media/Documents/3523/ZU>

B Aquavent Umwaelzpumpen DE EN 2013 10. pdf

7. The electric motor of a direct current DP 63-105-4,0-24 [Jelektrovigatel' postojannogo toka DP63-105-4,0-24], available at: <http://www.lepse.com/products/160/4687/>

8. Azarh, D. N. (1953), Pumps. Reference Catalogue-book [Nasosy. Katalog-Spravochnik]. Moscow, State scientific and technical publishing house of machine-building and shipbuilding literature, 428 p. (In Russian)

9. Speed Controller SPD-24250A Installation and Wiring, available at: <https://www.electricscooterparts.com/hookup/SPD-24250A.htm>

10. SS49ELinear Hall Effect Sensor, available at: [https://dscl.lcsr.jhu.edu/main/images/3/31/SS49e\\_Hall\\_Sensor\\_Datasheet.pdf](https://dscl.lcsr.jhu.edu/main/images/3/31/SS49e_Hall_Sensor_Datasheet.pdf)

11. 6DZM8 Factory Model CB10-12B, available at: <http://www.baacebattery.com/upload/2009829541599738.jpg>

12. Atmel-11057C-ATARM-SAM3X-SAM3A-Datasheet\_23-Mar-15, available at: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf)

13. ADR4520/ADR4525/ADR4530/ADR4533/ADR4540/ADR4550 Data Sheet, available at: <http://www.analog.com>

14. INA12x Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers, available at: <http://www.ti.com>

15. SPECIFICATION FOR LCD MODULE MODULE NO.: HTF0177SN-01 DOC.REVISION V1 , available at: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/HTF0177SN-01-SPEC.pdf>

16. ACS712 Datasheet., available at: [www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)

17. GP2Y0D805Z0F Distance Measuring Sensor Unit Digital output (50 mm) type, available at: [http://www.sharp.co.jp/products/device/doc/opto/gp2y0d805z\\_e.pdf](http://www.sharp.co.jp/products/device/doc/opto/gp2y0d805z_e.pdf)

18. Gerasimyak, R. P. (1992), Increase of the automatic control systems quality: Studies. manual [Povyshenie kachestva sistem avtomaticheskogo upravlenija: Ucheb. posobie]. Kyiv: UMK HG. 100 p. (in Russian)

19. multilayer ceramic capacitorsepoxy.pdf, available at: [https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/multilayer\\_ceramic\\_capacitorsepoxy.pdf](https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/multilayer_ceramic_capacitorsepoxy.pdf)

20. Moiseev, N. N. (1971), Numeral methods are in the theory of the optimal systems [Chislennye metody v teorii optimal'nyh sistem]. M., Nauka, 424 p. (In Russian)



## ENERGY EFFICIENCY INVESTIGATION OF A DRY DOCK DEWATERING PUMPS ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVE ON PHYSICAL MODEL

**P. Khristo**

*Odessa National Polytechnic University*

**Abstrat.** Based on the Arduino Due platform and electric pump U4814, a physical model has been developed to study the energy efficiency of the dry dock pumping station. It allowed to obtain the optimal control law for the supply voltage of the electric pump while maintaining its constancy and among piecewise linear time functions due to the numerical solution of the boundary value problem. A comparative analysis of competing managements confirmed the feasibility of using an adjustable electric drive. If, with a constant supply voltage, an optimal transient is performed, when the set liquid level is reached at the specified time with minimal energy consumption, the optimal piece-linear diagram of the pump motor supply voltage variation at the same time of the transient process provides a gain in the amount of energy consumed above 10%. Mathematical optimal operation modes modeling of the real dock pumping station main pumps predicts a lower saving value than the value obtained on the physical model, which is due to the use on the model of an electropump with a relatively small nominal The power of a long steady-state operating mode.

**Key words:** Adjustable electric drive, pump, hydraulic capacity, dry dock, energy saving, extremals, physical model, boundary value problem, numerical methods, Arduino Due.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЬОВАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ГОЛОВНИХ НАСОСІВ СУХОГО ДОКА НА ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ

**П. Е. Христо**

*Одеський національний політехнічний університет*

**Анотація.** На базі платформи Arduino Due і електронасоса U4814 розроблена фізична модель для дослідження енергоефективності насосної станції сухого доку. Вона дозволила отримати оптимальний закон управління напругою живлення електронасоса при підтримці її сталості і серед кусково-лінійних функцій часу завдяки чисельному рішенням крайової задачі. Порівняльний аналіз конкуруючих управлінь підтвердив доцільність застосування регульованого електроприводу.

**Ключові слова:** регульований електропривод, насос, гідравлічна ємність, сухий док, енергозбереження, екстремалі, фізична модель, крайова задача, чисельні методи, Arduino Due.

Получено 24.04.2017



**Христо Павел Евгеньевич**, специалист, старший преподаватель каф. Электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета, расположенного по адресу: проспект Шевченко, 1, г. Одесса; контактный телефон 0970090177; E-mail: [Pavel.John.Khristo@gmail.com](mailto:Pavel.John.Khristo@gmail.com)

**Pavel Khristo**, specialist, teacher of The Electromechanic systems with a computer control department, Odessa national polytechnic university, Ukraine, city Odessa, Shevchenko avenue, 1; contact phone 0970090177; E-mail: [Pavel.John.Khristo@gmail.com](mailto:Pavel.John.Khristo@gmail.com)

**ORCID ID:0000-0001-7275-0044**