

Р. Е. Мажирина



А. Н. Бушувев

DOI: 10.71527/EP.EN.2024.12.011

УДК 621.313:628.14

EDN: XXCPWH

Моделирование центробежного насоса системы водоснабжения в среде SimInTech

МАЖИРИНА Р. Е., канд. пед. наук, **БУШУЕВ А. Н.**, канд. техн. наук
Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС»
462359, Оренбургская область, г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8
bushuev.an@misis.ru

Рассмотрена теплогидравлическая модель насоса с полиномиальной характеристикой в программе SimInTech. Для построения модели центробежного насоса типа Д160-112 в паре с асинхронным электродвигателем применён расчётный код библиотеки «Теплогидравлика», предназначенный для моделирования динамики сжимаемого и несжимаемого теплоносителя. Посредством моделирования построены графики мощности асинхронного двигателя и насоса, графики крутящих моментов и скоростей вращения валов и проведено их сравнение. Анализ полученных результатов показал возможность применения для привода насоса электродвигателя типа 5AM250M2У.

К л ю ч е в ы е с л о в а: SimInTech, асинхронный двигатель, гидравлическая модель, крутящий момент, моделирование, мощность, центробежный насос.

Математические модели в программе SimInTech создаются посредством функционально-блочного программирования при помощи блоков, которые содержатся в различных библиотеках [1]. В SimInTech возможна разработка как простых моделей, подробно описывающих поведение какой-либо системы, так и сложных моделей, которые подробно описывают не только саму систему, но и алгоритмы управления, защиты, интерфейс управления и пр. [2].

Для создания моделей используются шаблоны проектов, которые наиболее полно удовлетворяют решению того или иного спектра задач.

Для исследования работы системы водоснабжения в программе SimInTech разработана математическая модель центробежного насоса, работающего на линию трубопроводов заданной длины. За основу взят насос типа Д160-112, относящийся к горизонтальным одноступенчатым центробежным насосам

с двухсторонним полуспиральным подводом жидкости к рабочему колесу и спиральным отводом [3, 4]. Насос Д160-112 заводом-изготовителем комплектуется электрическим двигателем мощностью 75 или 90 кВт. Основные параметры данного насоса приведены далее.

Технические характеристики насоса Д160-112

Напор, м	112
Расход, м ³ /ч	160
Допускаемый кавитационный запас, м	4,8
КПД номинальный, %	73
Максимальная скорость вращения, об/мин	2900
Масса, кг	200
Температура перекачиваемой жидкости, °С	до +85
Момент инерции, кг·м ²	9,4

Полезная мощность насоса может быть определена по формуле [4]:

$$P_{\text{пол}} = gh\rho G,$$

где h — создаваемый напор, м; G — производительность насоса, м³/с.

Требуемая мощность электрического двигателя [4]:

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_{\text{н}} \eta_{\text{дв}}},$$

где $\eta_{\text{н}}$ — КПД насоса, $\eta_{\text{дв}}$ — КПД электродвигателя.

Установленная мощность электрического двигателя [4]:

$$P_{\text{у.дв}} = \beta P_{\text{дв}},$$

где β — коэффициент запаса мощности (принимается $\beta = 1,1$).

$$P_{\text{пол}} = \frac{160}{3600} \cdot 112 \cdot 9,81 = 48,83 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{дв}} = \frac{48,83}{0,73 \cdot 0,935} = 71,54 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{у.дв}} = 1,1 \cdot 71,54 = 78,69 \text{ кВт.}$$

Исходя из требуемой мощности, к рассмотрению может быть принят электродвигатель типа 5AM250M2У3 номинальной мощностью 90 кВт. Основные технические характеристики двигателя приведены далее.

Технические характеристики электродвигателя 5AM250M2У3

Номинальная мощность, кВт	90
Номинальное напряжение, В	380/660
Синхронная скорость вращения, об/мин	3000
Номинальная скорость вращения, об/мин	2960
Коэффициент полезного действия, %	93,5
Коэффициент мощности	0,93
Отношение $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$	7
Отношение $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	1,8
Отношение $M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$	2,7
Момент инерции, кг·м ²	0,4

Данный двигатель — трёхфазный асинхронный общепромышленный агрегат с литой чугунной станиной монтажного исполнения IM1001, предназначенный для режима работы S1 с изоляцией класса F [5].

Проверку правильности выбора двигателя для насоса Д160-112 можно осуществить на теплогидравлической модели насоса с полиномиальной характеристикой в программе SimInTech. Расчётный код библиотеки «Теплогидравлика» (HS) предназначен для моделирования динамики сжимаемого и несжимаемого теплоносителя [2, 6].

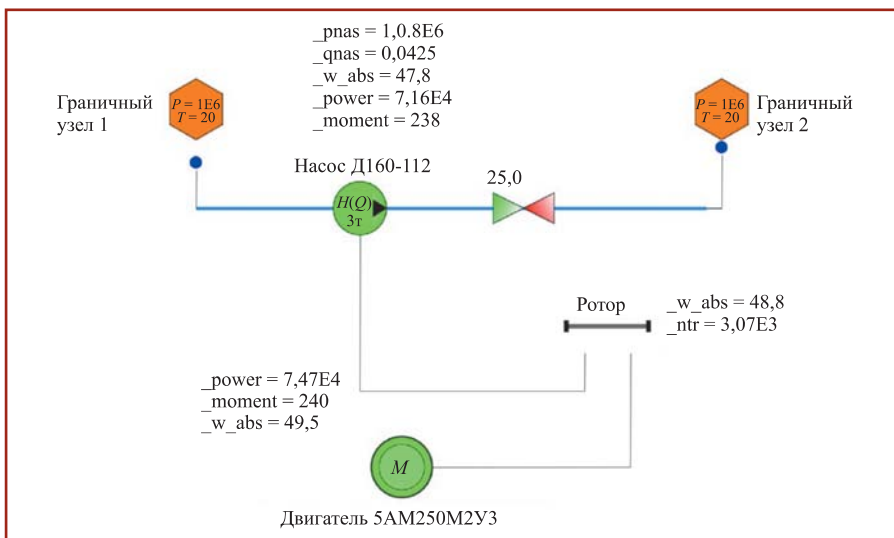


Рис. 1. Схема моделирования насоса с HS-асинхронным двигателем

Название	Имя	Формула	Значение
Номер элемента	Element	2	2
Наличие механического порта	MPort		<input checked="" type="checkbox"/> Да
Номинальная частота вращения, Гц	wn	2900/60	48.333333
Номинальный расход	Qnom	160	160
Максимальный расход	Qmax	200	200
Напор при Q=0	H0	120	120
Напор при Q=Qnom	H1	112	112
Напор при Q=Qmax	H2	107	107
Размерность напора	PressureDi...		м
Размерность расхода	FlowRateDi...		м³/ч
Учёт тепловых потерь	IsHeat		<input checked="" type="checkbox"/> Да
Обратное местное сопротивление	KstInv		0
КПД при Q=0	kpd0	0	0
КПД при Q=Qnom	kpd1	0.73	0.73
КПД при Q=Qmax	kpd2	0.7	0.7
Мощность при Q=0, Вт	N0	40e3	40000
Мощность при Q=Qnom, Вт	N1	75e3	75000
Мощность при Q=Qmax, Вт	N2	80e3	80000
Связь с базой данных			
Оформление			
Полином для напора	PolyH		[120, 0.01, -0.000...
Полином для мощности, Вт	PolyN		[40000, 293.75, -0...
Полином для КПД	PolyKPD		[0, 0.0088125, -2....

Рис. 2. Вид окна «Свойства» моделируемого насоса

Название	Имя	Формула	Значение
Тип	TYPE		5AM250M2У3
Частота питающей сети, Гц	f		50
Напряжение на статоре, В	U		380
Номинальная мощность, кВт	Pnom		90
Номинальное напряжение, кВ	Unom		0.38
Номинальный коэффициент мощности (Cosφ)	CosF		0.93
Номинальный КПД, %	Eff		93.5
Номинальная частота вращения, об/мин	Nnom	2960	2960
Номинальная частота питающей сети, Гц	fnom		50
Кратность максимального момента, о.е.	Mmax		2.7
Кратность пускового момента, о.е.	Mp		1.8
Кратность пускового тока, о.е.	Ip		7
Коэффициент степени моментной характеристики	MA		1
Число пар полюсов	p	1	1
Потребляемая полная номинальная мощность, кВА	Snom	103.5018...	103.50181
Потребляемая активная номинальная мощность, кВт	PnomA	96.25668...	96.256684
Номинальный ток, А	Inom	157.2547...	157.25473
Пусковой ток, А	Ipa	1100.783...	1100.7831

Рис. 3. Вид окна «Свойства» асинхронного двигателя

Схема насоса Д160-112 с асинхронным двигателем 5AM250M2У3 в программе SimInTech представлена на рис. 1.

Гидравлическая модель, состоящая из насоса, канала и задвижки с двух сторон, ограничена блоками «Граничный узел 1» и «Граничный узел 2». Расход воды в системе обеспечивается разностью давлений, задаваемых в граничных узлах схемы. Канал моделирует трубопровод без теплообмена с окружающей средой. Свойства канала, задаваемые в программе, приведены далее.

Свойства канала

Число расчётных элементов 1
 Гидравлический диаметр, м 0,12
 Длина элементов, м 100
 Форма канала круглая

Внешний вид окон «свойства» в программе SimInTech для моделируемого насоса и двигателя показаны на рис. 2 и 3 соответственно. На рисунках также выделены определяющие задаваемые параметры.

Блок «Ротор» в программе реализует динамическую модель вращающейся массы ротора асинхронного двигателя и вала насоса [6]. Ротор выступает связующим звеном, передающим вращающий момент от асинхронного двигателя к насосу. Задаваемые параметры (свойства) блока «Ротор» приведены в табл. 1. Так как источником движения является электродвигатель, то в качестве номинальной частоты вращения ротора указывается номинальная скорость асинхронного двигателя $n_{ном} = 2960$ об/мин.

Динамически изменяющиеся элементы на модели (см. рис. 1) выполнены в виде примитивов «Текст». Параметры примитивов, отображаемые в виде блоков «TextLabel», сведены в табл. 2.

Формат отображения числа в примитиве при необходимости может корректироваться во вкладке «Свойства объекта».

По результатам анализа значений, полученных в программе SimInTech, можно сделать следующие выводы:

- напор, развиваемый насосом, $h = 1,08$ МПа соответствует номинальному значению напора $h_{ном} = 112$ м;
- развиваемый насосом объёмный расход перекачиваемой среды $Q = 0,0425$ м³/с (или 153 м³/ч) соответствует паспортному значению $Q_{ном} = 160$ м³/ч;
- асинхронный двигатель в модели развивает мощность на валу $P_{дв} = 74,7$ кВт, а мощность на валу насоса составляет $P_{нас} = 71,6$ кВт, т. е. двигатель

Таблица 1

Название	Значения задаваемых показателей ротора в программе SimInTech	
	Формула	Значение
Число механических портов	—	2
Номинальная частота вращения, Гц	2960/60	49,33
Минимально возможная относительная частота вращения ротора	-3000/60	-50
Максимально возможная относительная частота вращения ротора	3000/60	50
Момент инерции ротора, кг·м ²	—	10
Коэффициент усиления полинома для вычисления момента трения, Н·м	—	10
Момент страгивания, Н·м	—	2

Таблица 2

Параметр	Имя	Значения параметров примитивов «TextLabel»	
		в основном формате	в экспоненциальном формате
Блок «Насос с полиномными характеристиками»			
Напор, Па	_pnas	1 081 217,9	1,08e6
Объёмный расход, м ³ /с	_qnas	0,042470498	0,0425
Частота вращения абсолютная, Гц	_w_abs	47,822646	47,8
Мощность на валу, Вт	_power	71635,284	7,16e4
Момент на валу, Н·м	_moment	238,40399	238
Блок «Ротор»			
Частота вращения абсолютная, Гц	_w_abs	48,806052	48,8
Мощность на трение, Вт	_ntr	3066,5747	3,07e3
Блок «Асинхронный двигатель»			
Мощность на валу, Вт	_power	74 702,169	7,47e4
Момент на валу, Н·м	_moment	240,32364	240
Частота ротора, Гц	_w_abs	49,471702	49,5

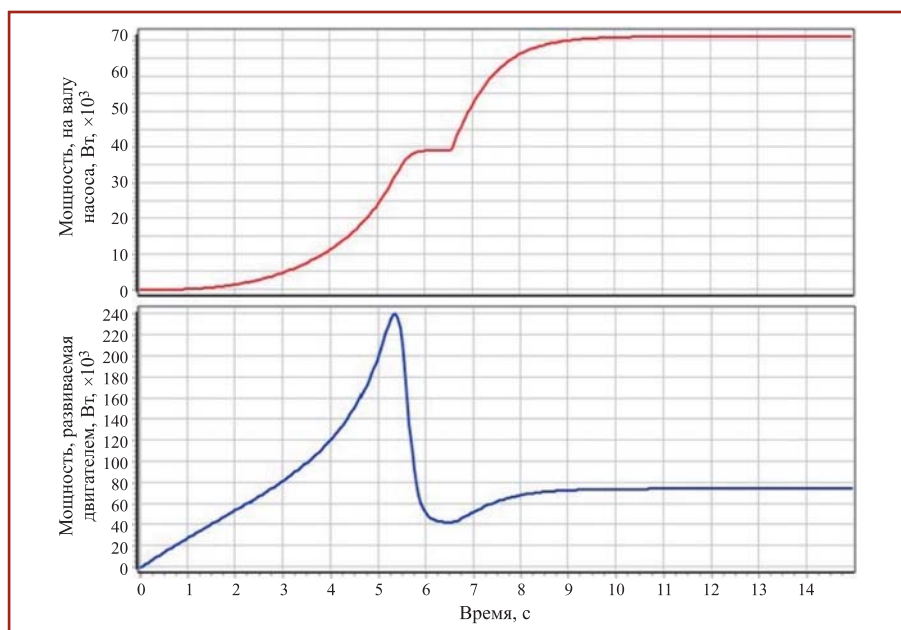


Рис. 4. Графики мощности электродвигателя и насоса

работает с нагрузкой, ниже номинальной $P_{ном} = 90$ кВт;

– крутящий момент, развиваемый асинхронным двигателем в модели, $M_{дв} = 240$ Н·м, превышает крутящий мо-

мент на рабочем колесе насоса, $M_n = 238$ Н·м.

Графики развиваемых мощностей и крутящих моментов двигателя и центробежного насоса, построенные для

модели в программе SimInTech, изображены на рис. 4 и 5. На графиках мощности и момента асинхронного двигателя отображены пиковые значения, которые определяются пусковыми свойствами и колебательным характером переходных процессов. Однако за счёт значительного момента инерции колеса насоса данные скачки мощности и момента на вал насоса не передаются.

К концу расчётного периода ($t = 15$ с) частота вращения двигателя составит 49,74 Гц, а колеса насоса — 47,83 Гц. Разность в скоростях вращения валов обусловлена возникновением потерь на трение в роторе, достигающих 3,07 кВт. Характер изменения частоты вращения вала двигателя и рабочего колеса насоса во времени показан в табл. 3.

Связь между напором, развиваемым насосом, и действительным расходом иллюстрирует рис. 6. Задаваемая степень открытия арматуры на трубопроводе — 25 %. Система «центробежный насос — асинхронный двигатель» выходит в стационарный режим работы через 10,5 с после подачи тока на двигатель. Согласно задаваемому программному коду открытие арматуры осуществляется по достижении давления в системе 1,05 МПа, (примерно через 6 с после подачи тока на двигатель), когда и начинается рост расхода воды по трубопроводу.

В заключение можно отметить, что моделирование в программе SimInTech позволяет с высокой точностью отобразить изменение основных параметров работы центробежного насоса и электродвигателя под нагрузкой в реальной системе водоснабжения, на основании чего можно утверждать, что в целом электродвигатель типа 5AM250M2Y3

Таблица 3

Время, с	Частота вращения двигателя, Гц	Частота вращения колеса насоса, Гц
0,5	4,310	4,167
1,0	8,516	8,232
2,0	16,683	16,127
3,0	24,685	23,862
4,0	32,872	31,777
5,0	42,244	40,836
6,0	49,648	47,993
6,5	49,709	48,052
7,0	49,638	47,984
8,0	49,517	47,869
9,0	49,485	47,836
10,0	49,477	47,827
15,0	49,474	47,825

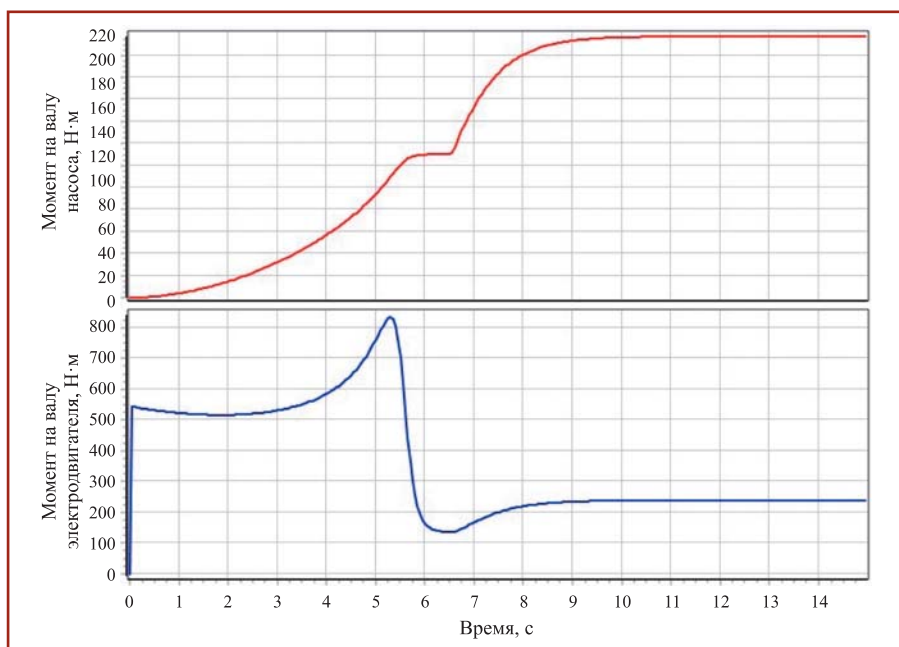


Рис. 5. Графики крутящего момента на валу электродвигателя и на валу насоса

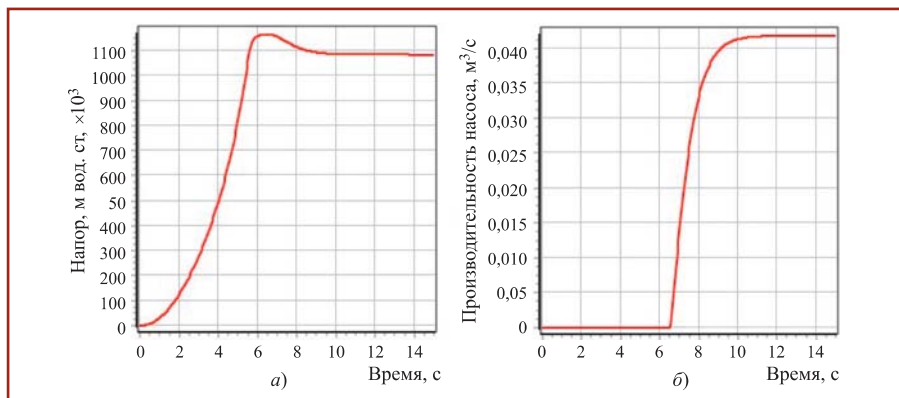


Рис. 6. Графики развиваемого напора и расхода:

а — график напора, развиваемого насосом, в м вод. ст.; б — график производительности насоса, м³/с

обеспечивает работу насоса Д160-112 с номинальными расходом и напором. При этом сам асинхронный двигатель работает не в номинальном режиме и с моментом ниже номинального значения ($M_{ад} = 240 \text{ Н}\cdot\text{м} < 290,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$). Соответственно подбираемый электродвигатель предварительно проходит по нагреву в режиме привода моделируемого насоса Д160-112.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабаров, С. П., Шилкина М. П. Основы моделирования технических систем. Среда Simintech. — СПб.: Лань, 2020. — 120 с.
2. Карташов Б. А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов и др. — Москва: ДМК Пресс, 2017. — 424 с.
3. Аникин Ю. В., Царев Н. С., Ушаков Л. И. Насосы и насосные станции: учеб. пособие / Науч. ред. В. И. Аксенов: — Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2018. — 138 с.
4. Васильев В. М., Федоров С. В., Кудрявцев А. В. Гидравлические машины (насосы): учеб. пособие. — М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 140 с.
5. Встовский А. Л. Электрические машины: учеб. пособие. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. — 464 с.
6. Герман-Галкин С. Г., Карташов Б. А., Литвинов С. Н. Модельное проектирование мехатронных модулей SimInTech: учеб. пособие / Под. ред. А. Н. Петухова. — М.: ДМК Пресс, 2021. — 494 с.

Вышли в свет в 2023 году следующие выпуски «Библиотеки электротехника» — приложения к журналу «Энергетик»

- № 1. Шульга Р. Н., Хренников А. Ю. Расчетные режимы, разработка и испытания высоковольтных выключателей для генераторов, трансформаторов, конденсаторных батарей. Часть 2. Разработка выключателей
- № 2. Рабинович М. А., Моржин Ю. И., Потапенко С. П., Каковский С. К., Девяткин М. В. Модели реального времени в задачах оперативного управления ЭЭС. Часть 1
- № 3. Рабинович М. А., Моржин Ю. И., Потапенко С. П., Каковский С. К., Девяткин М. В. Модели реального времени в задачах оперативного управления ЭЭС. Часть 2
- № 4. Шульга Р. Н. Специальные вопросы электрооборудования. Контроллеры и преобразователи. Часть 1
- № 5. Захаров О. Г. Блоки питания цифровых устройств релейной защиты. Испытания
- № 6. Шульга Р. Н., Хренников А. Ю. Расчетные режимы, разработка и испытания выключателей. Часть 3. Испытания выключателей
- № 7. Перминов Э. М. Российская ветроэнергетика. История. Состояние. Перспективы
- № 8. Львов М. Ю., Лесив А. В. Термоиндикаторный контроль контактов и контактных соединений электрооборудования и линий электропередачи
- № 9. Кувшинов А. А., Вахнина В. В., Хренников А. Ю. Передача в искусственном режиме натуральной мощности по ВЛ 6 – 110 кВ распределительных сетей. Часть 1
- № 10–11. Беляев А. В., Юрганов А. А. Электростанции малой энергетики. Релейная защита и автоматика. Часть 1
- № 12. Гариевский М. В., Лазарев Г. Б., Хрусталев В. А. Маневренность энергоблоков АЭС с частотно-регулируемыми электроприводами главных циркуляционных насосов. Проблемы и перспективы. Часть 1