

## Изучение энергопотребления в модели шагового двигателя

*А.В. Ярцев, С.А. Синютин*

*Южный федеральный университет, Таганрог*

**Аннотация:** В статье описано моделирование в среде Simulink работы шагового двигателя, используемого в качестве электропривода механизма сканирования для прибора ориентации на Землю. Цель исследования – определить минимум затрачиваемой мощности в заданном диапазоне значений по индуктивности и сопротивлению. При обнаружении неработоспособности модели выше некоторых значений указанных величин, диапазон измерений сужается до области, где энергии достаточно для правильной отработки заданного угла. Моделирование опирается на параметры двигателей линейки NEMA 17, в частности NEMA 17HS3410. Управление напряжением в системе происходит посредством пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора), показано влияние регулятора на энергопотребление системы. Найдены наименьшие значения мощности, при которых двигатель работоспособен. Результаты работы визуализированы в виде трёхмерных поверхностей, выработаны рекомендации по продолжению исследований.

**Ключевые слова:** шаговый двигатель, моделирование, прибор ориентации на Землю, энергопотребление.

### Введение

В технике космического назначения крайне важны массогабаритные характеристики узлов и потребление электроэнергии управляющими цепями. Для прибора ориентации по Земле была поставлена задача изучить шаговый двигатель, обеспечивающий поворот фотоприёмного устройства при сканировании окружающего пространства и выделении небесных ориентиров. Использование такого двигателя для данной задачи обосновано ранее выполненными работами, отражёнными в статье [1].

### Объект исследований и постановка задачи

Для исследования была взята стандартная модель шагового двигателя «Power Stepper Motor», реализованная в среде Matlab Simulink [2,3]. В первоначальную структуру модели внесены изменения: так, блок «Signal Builder» заменён на два генератора прямоугольных импульсов с разным периодом, чтобы обеспечить симуляцию периодического поворота ротора на

---

заданный угол и возврата обратно. Подобная задача рассматривается, например, в [4] и является достаточно наглядным свидетельством того, как двигатель обрабатывает пошаговый поворот. Поскольку управление поворотом происходит через подачу управляющего напряжения на двигатель, исследованы параметры ПИ-регулятора, который используется для формирования управляющего напряжения по рассогласованию между заданной и измеренной угловой скоростью. Поставлена задача сделать так, чтобы напряжение на входе модели не превышало 27 В, поскольку именно это напряжение используется в космической промышленности для схожих устройств. Вид итоговой модели показан на рис.1.

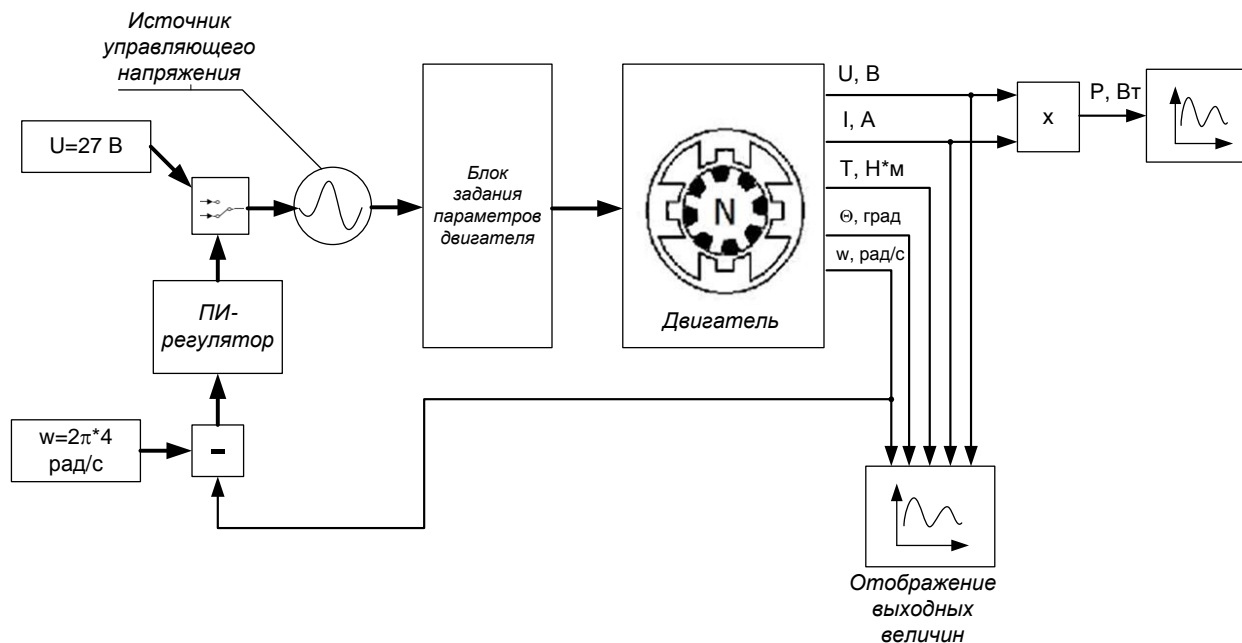


Рис.1 – Общий вид модели шагового двигателя

В качестве реального примера двигателя для модели используем параметры шагового двигателя NEMA 17HS3410, выбранного как оптимальный для данной задачи в работе [1]. Он имеет следующие характеристики:

- шаг по углу – 1,8 градуса,
- индуктивность – 1,8 мГн,

- сопротивление – 1,2 Ом,
- удерживающий момент – 0,028 Н\*м,
- крутящий момент – 0,016 Н\*м,
- инерция –  $34 \cdot 10^{-7}$  кг\*м<sup>2</sup>,
- коэффициент трения –  $10^{-4}$  Н\*м\*с,
- номинальная сила тока – 1,7 А.

Коэффициенты ПИ-регулятора: П = 0,27, И = 0,01.

Как указано в [5], главное достоинство двигателей серии NEMA 17 - большой крутящий момент, нежели у аналогичных шаговых двигателей, например, из серии NEMA 14. Такие двигатели широко применяются, например, для 3D-печати [6], потому что они работоспособны при высоких температурах до 180°C. Также они применяются в станках с ЧПУ и сканерах. За счёт своих маленьких размеров они доступны к экспериментальному управлению посредством программируемых плат Arduino [7].

Поставлена задача определить, при каких значениях сопротивления и индуктивности в системе наблюдается минимум потребляемой мощности, но при этом выполняется задача отработки поворота на заданный угол и удержания угловой скорости не менее чем 50 рад/с. Также следует понять, является ли выбранный двигатель наилучшим в своём классе двигателей по критерию минимального энергопотребления и наибольшей угловой скорости. Это нужно для того, чтобы выработать рекомендации по разработке двигателя специально для исследуемой системы, имеющего оптимальные механические и электрические характеристики.

Теория причин потерь энергии в шаговых двигателях изложена, например, в [8]. К бесполезным потерям энергии приводят либо колебательное движение ротора в установившемся режиме, либо нагревание обмоток при удержании положения.

## Измерения и анализ их результатов

При тестовом запуске модели с указанными выше параметрами на промежутке в 5 секунд были получены графики пяти измеряемых величин: напряжения, силы тока, крутящего момента, угловой скорости и угла поворота. Они показаны на рис.2.

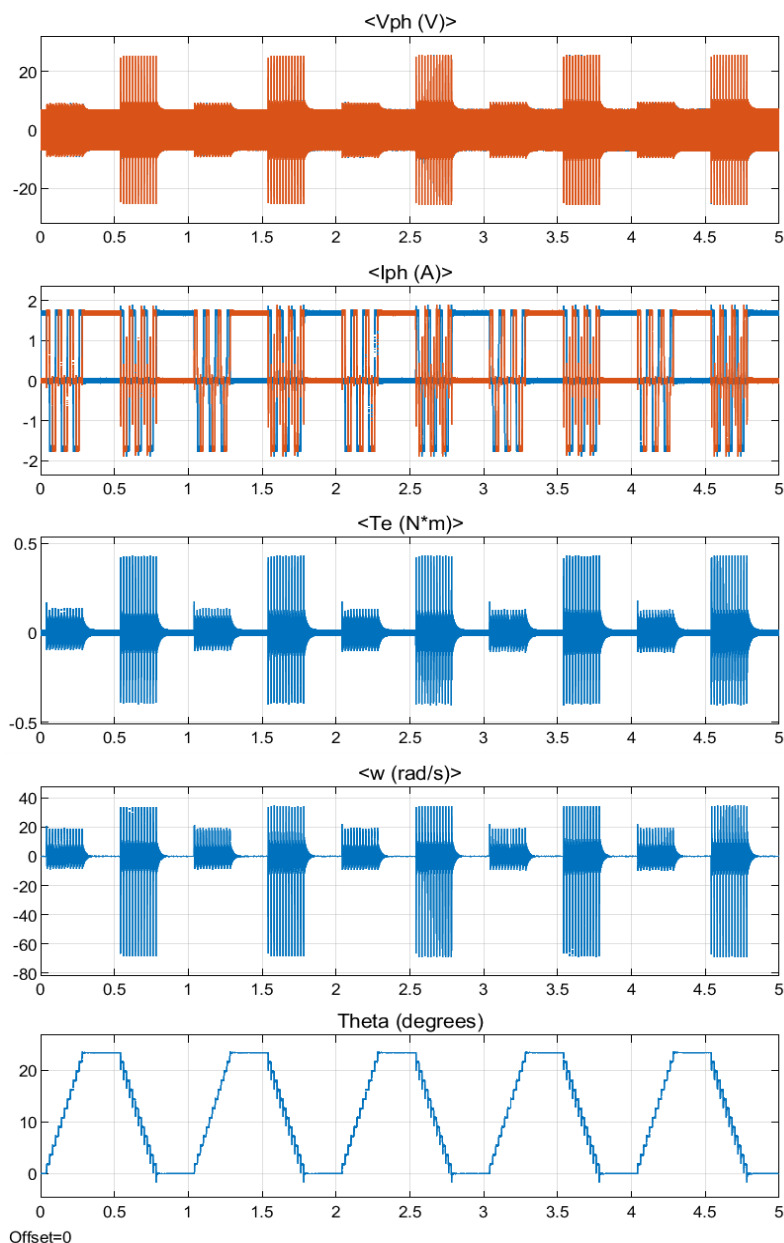


Рис.2 – Выходные характеристики модели шагового двигателя

Из графика следует, что входное напряжение, формируемое на выходе ПИ-регулятора, при движении ротора в прямом направлении имеет меньшую амплитуду изменения, по сравнению с обратным вращением. Соответственно отличается и амплитуда по угловой скорости и моменту вращения.

Для первоначального сравнения проведён также запуск модели без ПИ-регулятора (т.е. модели разомкнутой автоматической системы), где источник напряжения подаёт в систему постоянные 27 В. Графики на выходе модели отражены на рис.3.

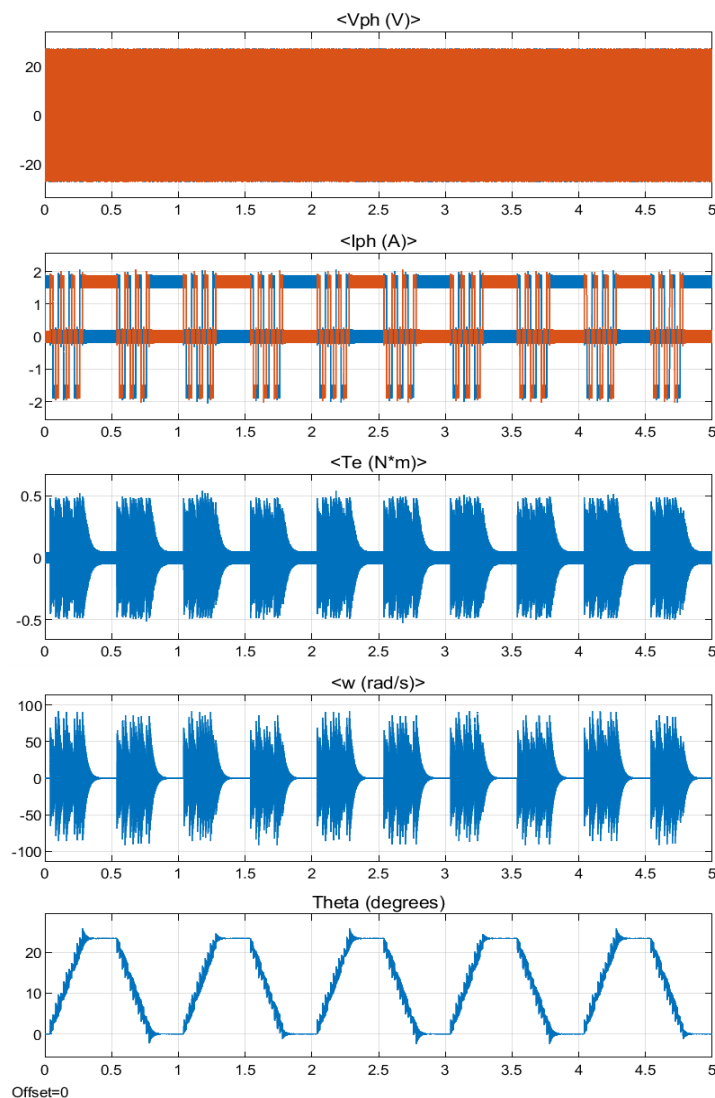


Рис.3 – Выходные характеристики модели шагового двигателя при постоянном входном напряжении без регулятора

Можно заметить, что в этом случае движение ротора в обе стороны имеет одинаковый момент и скорость, но сама угловая скорость больше, поэтому при смещении ротор двигателя испытывает затухающие колебания около нового положения. Таким образом, использовать ПИ-регулятор выгоднее для обеспечения плавности хода ротора, и по потребляемой мощности тоже, так как с ПИ-регулятором графики и напряжения, и тока имеют меньшую амплитуду.

В доказательство этому были проведены множественные измерения мощности при разных значениях сопротивления и индуктивности в электрической части двигателя. Механические характеристики объекта управления соответствуют двигателю NEMA 17HS3410. Мощность в данном случае является параметрически неопределённой величиной, т.е. анализ её поведения ведётся с помощью адаптивной настройки параметров системы [9]. Поверхности изменения мощности показаны в таблице 1.

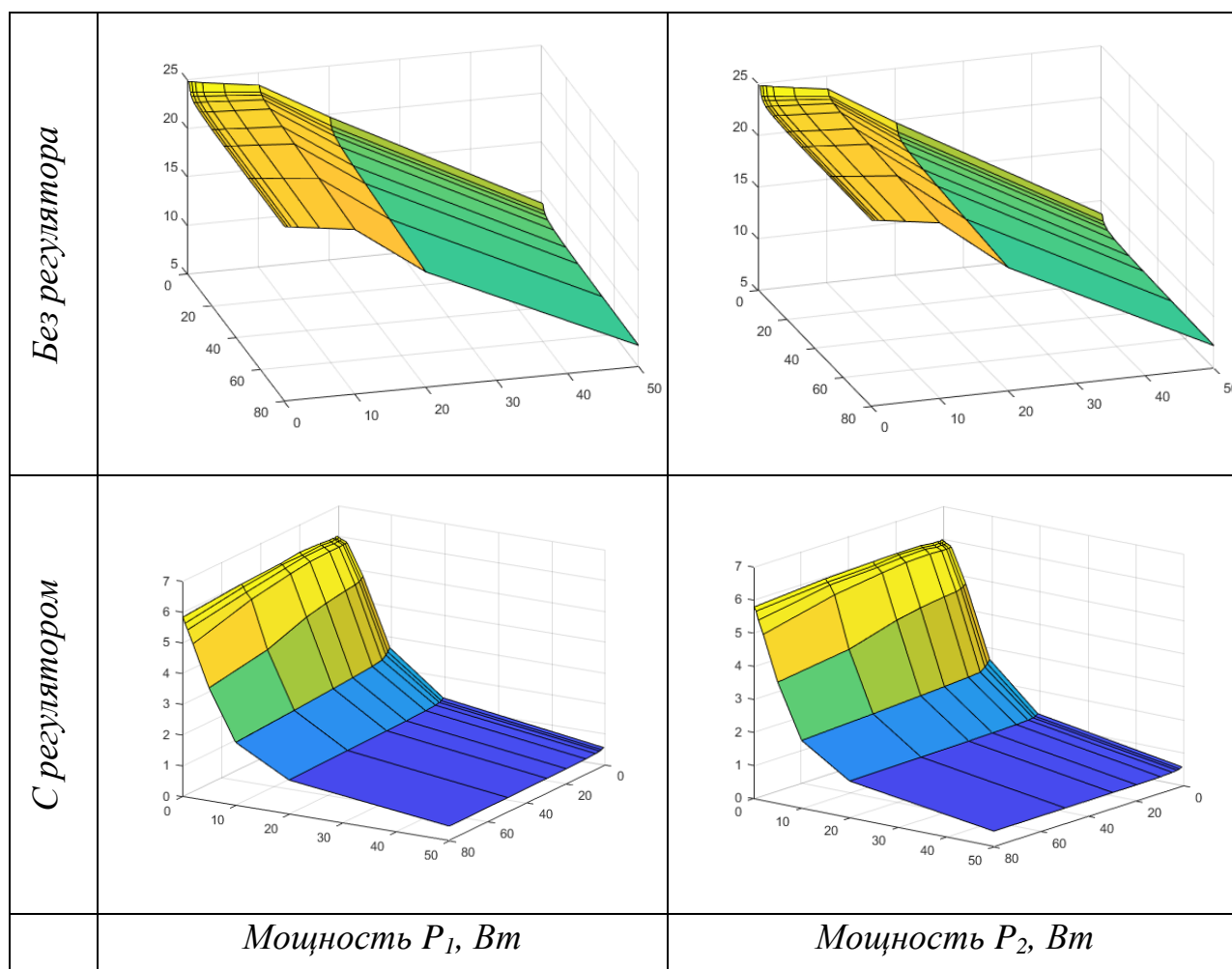
Из этих измерений следует, что энергопотребление в системе с ПИ-регулятором будет всегда кратно меньше, нежели без него. При росте  $R$  мощность в системе снижается, от некоторых пороговых значений сопротивления задача отработки поворота на заданный угол не выполняется при любой индуктивности  $L$ . При росте индуктивности потребляемая мощность плавно снижается и меняется незначительно: от 25 до 23 Вт без регулятора и от 6,05 до 5,84 Вт с регулятором. Наибольшее относительное видимое снижение мощности вдоль координаты  $L$  наблюдается на промежутке от 1 до 2 мГн.

Теперь соизмерим полученные результаты с реально доступными к воплощению. Параметры линейки шаговых двигателей NEMA 17 приведены в [10]. Приведём значения наиболее подходящей модели двигателя.

---

Таблица №1

Зависимость мощности двигателя от сопротивления и индуктивности



Значения средней мощности за 5 секунд для каждого из двигателей показаны в табл.2.

Таким образом, половина представленных двигателей при заданных механических и электрических параметрах не может даже обеспечить сдвиг на значительный угол, часть выполняет поворот на меньшие углы из-за малой скорости, а выбранный двигатель модели 3410 способен обеспечивать максимальную угловую скорость при меньшем энергопотреблении как с регулятором, так и без него, отчего его выбор для данного устройства наиболее оправдан.

Таблица №2

Значения мощности для выбранного двигателя 17HS3410

Тип двигателя	С ПИ-регулятором			На постоянном напряжении		
	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	ω <sub>max</sub> , рад/с	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	ω <sub>max</sub> , рад/с
17HS3410	5,9864	5,9513	66,97	24,0586	24,0603	97,15

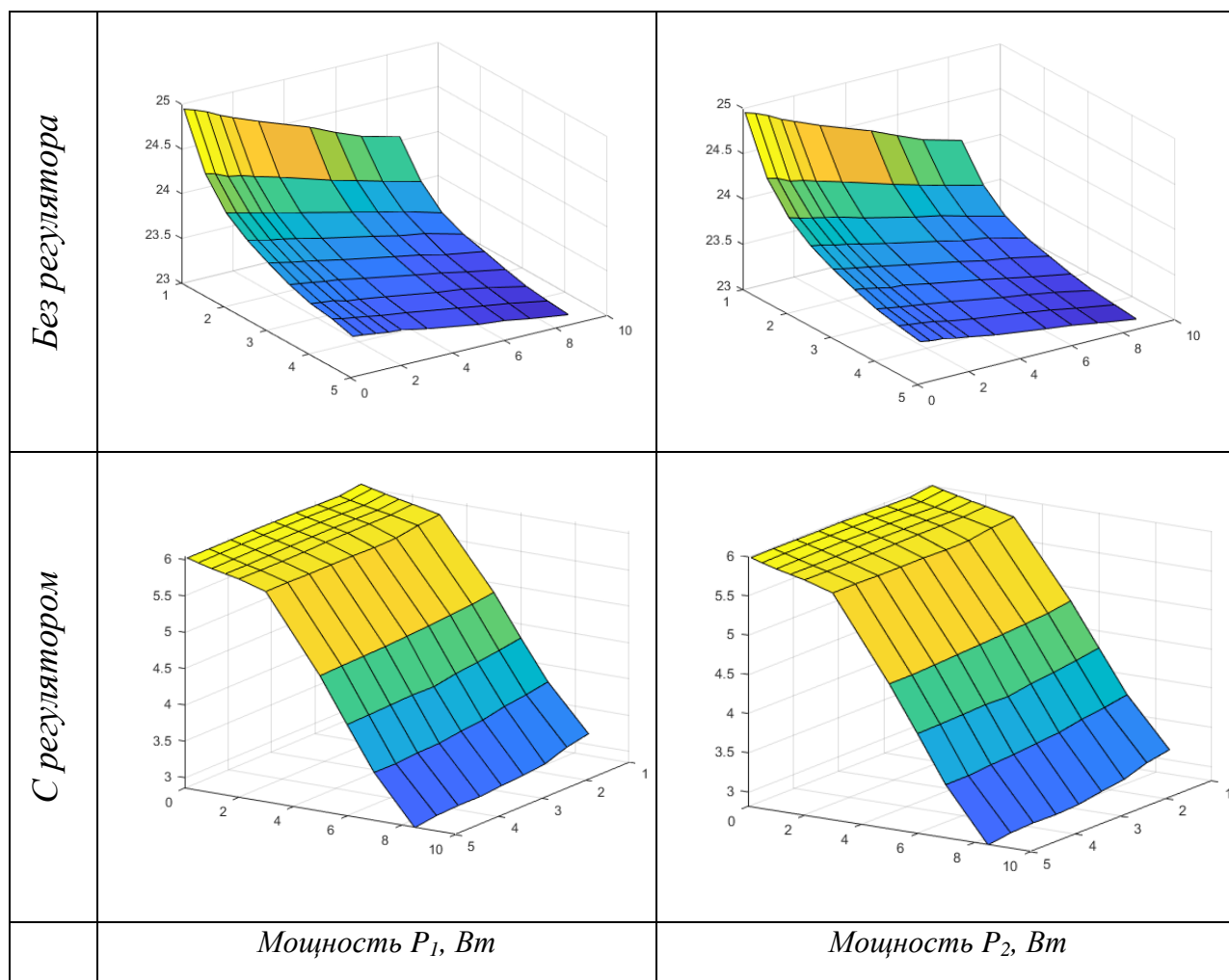
Теперь, когда вид поверхности энергопотребления в широком диапазоне электрических параметров известен, можно сузить этот диапазон до значений, где отработка угла гарантированно выполняется, и определить, является ли выбранный двигатель оптимальным по энергопотреблению в диапазоне близких значений R и L. В новой серии измерений мощность определена в диапазоне значений по R от 0,1 до 10 Ом и по L от 1 до 5 мГн. Результаты вычислений в виде поверхностей представлены в таблице 3.

Из этих рисунков видно, что энергопотребление выбранного для ПОЗ двигателя NEMA 17HS3410 с R = 1,2 Ом и L = 1,8 мГн не является минимальным его значением на поверхности, так как соответствующая точка лежит практически в одной плоскости с соседними при условии, что ПИ-регулятор включён. Таким образом, можно считать, что рассматриваемая система управления является робастной в диапазоне сопротивлений от 0,1 до 3 Ом, так как выполняет задачу управления углом поворота при всех значениях из этого диапазона.

Таблица №3

Зависимость мощности двигателя от сопротивления и индуктивности при  
уменьшении диапазона измерений

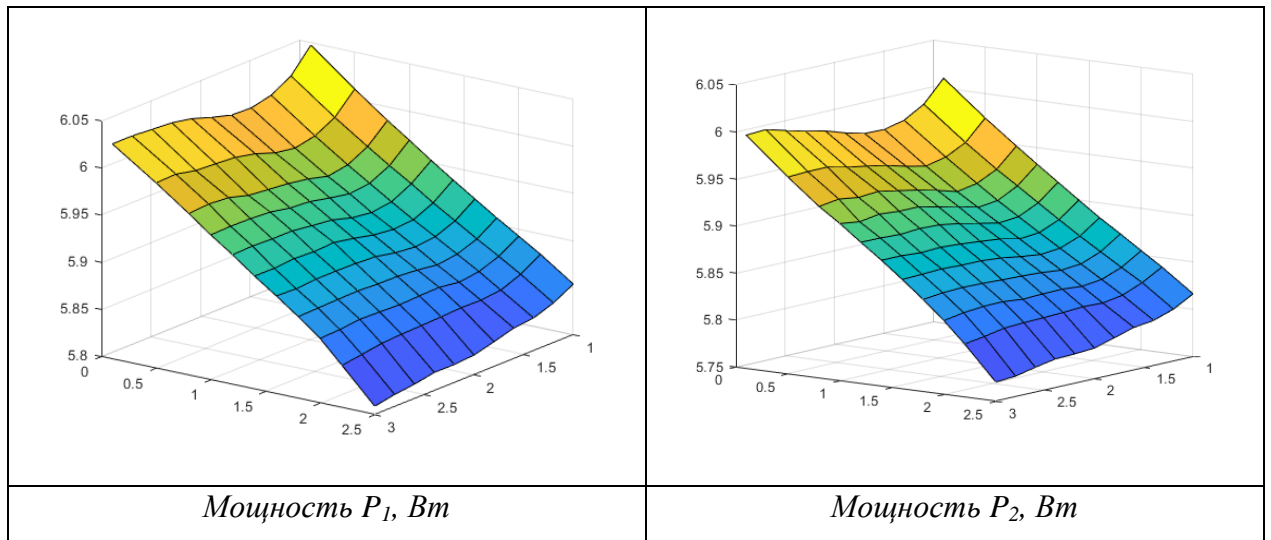




Относительно интересующей области шаг измерения был уменьшен ещё раз: по  $R$  от 0,1 до 2,5 Ом и по  $L$  от 1 до 3 мГн с шагом 0,2 мГн. ПИ-регулятор включён при всех измерениях, т.к. без него испытывать модель очевидно является нецелесообразным. Цель этого – увидеть, равномерно ли меняется энергопотребление на выбранном участке координат по  $L$  и  $R$ . Поверхности изменения мощности для этой серии измерений представлены в таблице 4.

Таблица №4

Зависимость мощности двигателя от сопротивления и индуктивности для  $L$  до 3 мГн и  $R$  до 2,5 Ом



На этих поверхностях заметно, что спад мощности с ростом сопротивления до 2,5 Ом происходит постоянно, хотя и не столь резко, как при сопротивлениях, превышающих 5 Ом. Поверхность имеет изгибы, указывающие на нелинейность изменений: так, можно заметить «ложбину» в диапазоне индуктивности от 1,2 до 2 мГн. Для выбранного двигателя наблюдается локальный минимум энергопотребления, но он не является абсолютным в выбранной области: локальный спад составляет 2% от максимального значения, а глобальный 4%.

Таким образом, при объединении результатов по всем измеренным диапазонам получаем, что значения мощности имеют нелинейную зависимость от сопротивления и индуктивности. При этом рост  $R$  влияет куда сильнее, чем рост  $L$ . Если посмотреть на график колебаний мощности (рис.4), можно заметить, что она претерпевает скачки при запуске поворота на угол и затем спадает до некоторого постоянного значения. Потреблённая энергия имеет график, схожий с кусочно-линейным (рис.5), но на промежутках времени, соответствующих повороту ротора двигателя, на линейную составляющую накладываются периодические колебания, соответствующие прерывистому движению при смещении с шагом в 1,8 градуса.

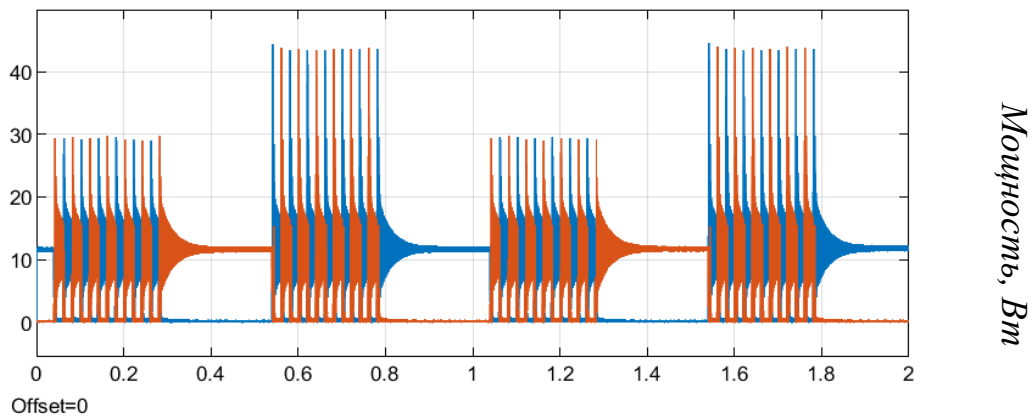


Рис.4 – График мощности в шаговом двигателе

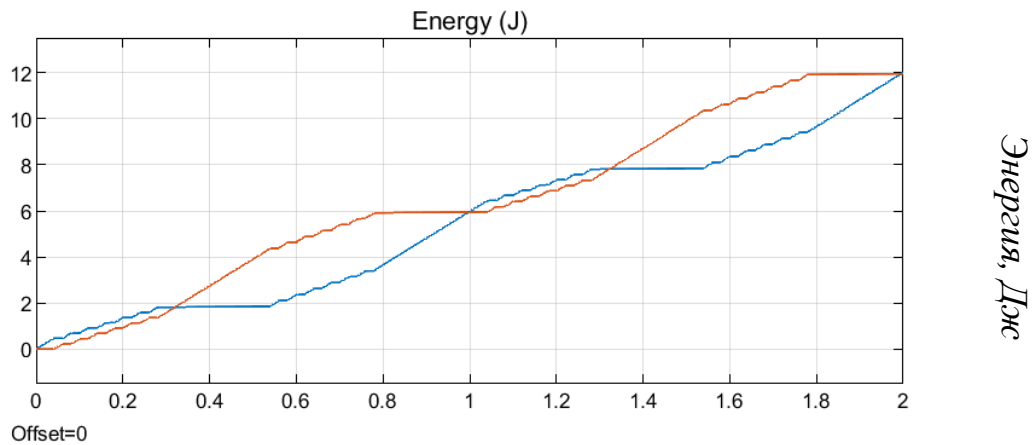


Рис.5 – График энергии в шаговом двигателе

Далее было проверено, на каких значениях сопротивления мощность перестаёт быть достаточной для выполнения задачи по набору угла. Для этого берутся три значения индуктивности – 1, 2 и 3 мГн, а сопротивление задано в диапазоне от 5 до 20 Ом. Числовые значения мощности показаны в табл.5, а поверхности изменения – в табл.6.

Таблица №5

Числовые значения мощности при различных R и L

L, мГн	R, Ом	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	L, мГн	R, Ом	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	L, мГн	R, Ом	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	5	4.8712	4.8233	2	5	4.8076	4.7553	3	5	4.7657	4.717

6	4.3068	4.2818	6	4.2224	4.1946	6	4.1367	4.1134
7	3.7678	3.7426	7	3.6778	3.6543	7	3.588	3.5739
8	3.3403	3.3221	8	3.2165	3.1939	8	3.1105	3.0729
10	2.6955	2.6767	10	2.5918	2.5755	10	2.5165	2.4925
12	2.2427	2.2033	12	2.1338	2.1028	12	2.0774	2.0412
14	1.887	1.8413	14	1.8171	1.7817	14	1.7803	1.7543
16	1.6611	1.6241	16	1.5983	1.566	16	1.5708	1.5423
18	1.4948	1.4624	18	1.4358	1.4052	18	1.4063	1.3811
20	1.3548	1.3304	20	1.2965	1.2747	20	1.2685	1.2514

Здесь велось также наблюдение за отработкой угла во времени по графику. Получено, что при 5 Ом угол растёт и уменьшается нормально. При 6 Ом набор положительного угла не происходит, мощности хватает только на поворот в отрицательном направлении, со временем увеличивающийся. Далее, до 12 Ом это поведение повторяется, но угол поворота становится всё меньше. При 14 Ом двигатель вообще не трогается с места, а дрожит около начального положения.

Были проверены также значения R в промежутке от 5 до 6 Ом и от 12 до 14 Ом при постоянной индуктивности в 1 мГн, чтобы точно определить границы разных типов поведения модели двигателя. Результаты показаны в таблице 7.

Здесь отмечено, что от 5 до 5,5 Ом угол отрабатывается как положено, но с повышением сопротивления уменьшается угловая скорость, и сдвиги становятся более плавными. Уже на 5,6 Ом задача перестаёт выполняться, угол смещается только в отрицательную сторону. То есть критическое значение мощности по отработке заданного угла для механических параметров, соответствующих двигателю 17HS3410, равно примерно 4,4 Вт. Можно заметить, что при переходе от движения в обе стороны к движению в одну сторону мощность немного возрастает до 4,45 Вт.

Таблица №6

Поверхности изменения мощности для трёх фиксированных значений  $L$

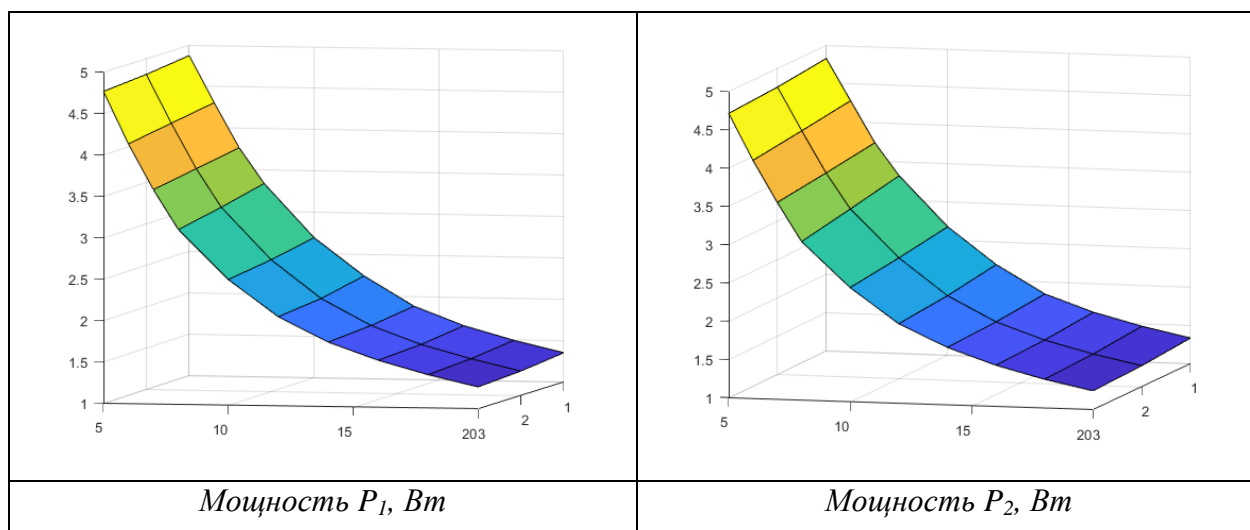


Таблица 7

Изменение мощности при измерении  $R$  с шагом 0,1 Ом для предела корректности и 0,2 Ом для страгивания

$L$ , мГн	$R$ , Ом	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$R$ , Ом	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт
1	2	3	4	5	6	7
1	5	4.7789	4.7328	12	2.1639	2.1262
1	5,1	4.7045	4.658	12,2	2.1305	2.0953
1	5,2	4.6286	4.5772	12,4	2.0946	2.066
1	5,3	4.5539	4.5055	12,6	2.0636	2.0354
1	5,4	4.4816	4.4329	12,8	2.0334	2.0035
1	5,5	4.392	4.346	13	2.0027	1.9721
1	5,6	4.4502	4.4701	13,2	1.9682	1.9748
1	5,7	4.4066	4.3939	13,4	1.937	1.9071
1	5,8	4.3597	4.3233	13,6	1.9045	1.8561
1	5,9	4.2887	4.2598	13,8	1.8762	1.8279

На промежутке от 12 до 14 Ом до 13,4 Ом отрабатывается малый угол в минус 7-8 градусов, мощности хватает только на первые шаги, дальше возможно только удержание этого угла. На 13,6 Ом уже никакого движения нет, мощности недостаточно даже для первого поворота двигателя.

Уточнение показало, что нет движения, начиная от 13,55 Ом., т.е. критическая мощность страгивания – 1,92 Вт.

### **Выводы**

Для модели гибридного шагового двигателя с выбранными механическими параметрами были изучены электрические характеристики в широком диапазоне значений по индуктивности и сопротивлению. Получено, что использование ПИ-регулятора позволяет четырёхкратно снизить расход электроэнергии в системе. Определено, в каком диапазоне значений задача поворота на заданный угол выполняется успешно при почти неизменном энергопотреблении: по сопротивлению это 1-3 Ом, по индуктивности это 1-20 мГн. Были найдены минимумы мощности, при которых двигатель ещё может выполнять заданное перемещение (4,4 Вт), а также в принципе выполнять поворот (1,92 Вт).

На будущее предполагается, после нахождения оптимальных параметров по L и R для постоянных механических характеристик, изучить влияние на электрическую мощность изменений коэффициента трения и момента инерции двигателя.

Работы, результаты которых представлены в данной статье, проводились на базе ФГАОУ ВО ЮФУ совместно с ОАО НПП КП «Квант» в рамках проекта: «Разработка и создание инновационного стендового оборудования и высокотехнологичного производства радиационностойкого малогабаритного прибора ориентации космических аппаратов на Землю секущего типа на базе электронных компонентов отечественного производства» по Постановлению Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218 «Об утверждении Правил предоставления субсидий на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора

экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств».

### Литература

1. Синютин С.А., Горбунов А.А., Киснер А.Ю. Разработка динамической модели электропривода механизма сканирования ПОЗ. // Инженерный вестник Дона, 2020, №10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6639](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6639).

2. Implement stepper motor model. Simulink. URL: [mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/steppermotor.html](https://mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/steppermotor.html) (дата обращения: 3.11.2021).

3. Емельянов А.А., Бесклеткин В.В., Авдеев А.С., Габзалилов Э.Ф., Прокопьев К.В., Ситенков А.А., Пестеров Д.И., Юнусов Т.Ш., Устинов А.П. Математическое моделирование электропривода на базе гибридного шагового двигателя в пакете SimPowerSystems. // Молодой учёный, №15 (119), август 2016 г. С.5-9.

4. Stepper Motor with Control. MATLAB & Simulink. URL: [mathworks.com/help/physmod/sps/ug/stepper-motor-with-control.html](https://mathworks.com/help/physmod/sps/ug/stepper-motor-with-control.html) (дата обращения: 3.11.2021).

5. NEMA 17 и Arduino – схема подключения и программа для управления с помощью драйвера A4988. URL: [microkontroller.ru/arduino-projects/upravlenie-shagovym-dvigatелеm-nema-17-s-pomoshhyu-arduino-i-drajvera-a4988/](http://microkontroller.ru/arduino-projects/upravlenie-shagovym-dvigatелеm-nema-17-s-pomoshhyu-arduino-i-drajvera-a4988/) (дата обращения: 3.11.2021).

6. Шаговые двигатели (NEMA17). Греть или не греть? URL: [3dtoday.ru/blogs/sendel/shagovye-dvigateli-nema17-gret-ili-ne-gret](https://3dtoday.ru/blogs/sendel/shagovye-dvigateli-nema17-gret-ili-ne-gret) (дата обращения: 3.11.2021).

7. Шаговый мотор NEMA 17, серии 17HS4402 + драйвер A4988 + Arduino NANO. Клуб технического творчества. URL: [techclub.su/article\\_arduino07](http://techclub.su/article_arduino07) (дата обращения: 3.11.2021).

8. Солоха А.А., Кобак В.Г. Энергосбережение при управлении шаговым двигателем. // Известия ТРТУ, №11 (55), 2005. С. 140-143.

9. Целигоров Н.А., Целигорова Е.Н., Мафура Г.М. Математические модели неопределенностей систем управления и методы, используемые для их исследования. // Инженерный вестник Дона, 2012, №4, ч.2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/ 1340.

10. Шаговые двигатели NEMA 17. Конструкторское бюро онлайн. URL: cb-online.ru/spravochniky-online/online-spravochnik-konstruktora/komplektuyushie-cnc/ (дата обращения: 12.10.2021).

### References

1. Sinyutin S.A., Gorbunov A.A., Kisner A.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/ n10y2020/6639.

2. Implement stepper motor model. Simulink. URL: mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/steppermotor.html. (Date accessed:3.11.2021)

3. Emel'yanov A.A., Beskletkin V.V., Avdeev A.S., Gabzalilov E`F., Prokop`ev K.V., Sitenkov A.A., Pesterov D.I., Yunusov T.Sh., Ustinov A.P. Molodoj uchyony`j, 2016. №15 (119). Pp.5-9.

4. Stepper Motor with Control. MATLAB & Simulink. URL: mathworks.com/help/physmod/sps/ug/stepper-motor-with-control.html.(Date accessed: 3.11.2021)

5. NEMA 17 i Arduino – sxema podklyucheniya i programma dlya upravleniya s pomoshh`yu drajvera A4988 [NEMA 17 and Arduino - wiring diagram and control program using the A4988 driver.]. URL: mikrokontroller.ru/arduino-projects/upravlenie-shagovym-dvigatelim-nema-17-s-pomoshhyu-arduino-i-drajvera-a4988/. (Date accessed:3.11.2021)

6. Shagovy`e dvigateli (NEMA17). Gret` ili ne gret`? [Stepper motors (NEMA17). To warm or not to warm?]. URL: 3dtoday.ru/ blogs/sendel/shagovy-e-dvigateli-nema17-gret-ili-ne-gret. (Date accessed:3.11.2021)

7. Shagovy`j dvigatel NEMA 17, serii 17HS4402 + drajver A4988 + Arduino NANO. Klub texnicheskogo tvorchestva [Stepper motor NEMA 17, series





17HS4402 + driver A4988 + Arduino NANO. Technical Creativity Club]. URL: techclub.su/article\_arduino07. (Date accessed:3.11.2021)

8. Soloxa A.A., Kobak V.G. Izvestiya TRTU, 2005, №11 (55). pp. 140-143.

9. Celigorov N.A., Celigorova E.N., Mafura G.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №4 (2). URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1340. (Date accessed:3.11.2021)

10. Shagovy`e dvigateli NEMA 17. Konstruktorskoe byuro onlajn [NEMA stepper motors 17. Design office online]. URL: cb-online.ru/spravochniki-online/online-spravochnik-konstruktora/komplektuyushie-cnc/. (Date accessed:12.10.2021)