

УДК 621.313.8

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.08

Б.В. Кавалеров, Д.В. ФалалеевПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИБРИДНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Важной особенностью математических моделей является тот факт, что их математическое описание возможно упростить. Это делается не только по причине такой возможности, но и ввиду необходимости повысить ее быстродействие. Чем проще модель, тем быстрее происходит расчёт переменных, тем легче она алгоритмизируется. Упрощение является сложным и важным этапом разработки модели, поскольку требует понимания главных процессов в исследуемом объекте. **Цель работы:** исследовать возможность замены модели гибридного шагового двигателя на линеаризованную модель шагового двигателя для использования этой модели в процедурах синтеза системы управления. **Методы:** исследована математическая модель гибридного шагового двигателя на основе математических моделей Лагранжа – Максвелла; разработана модель системы обратной связи по положению ротора для возможности управления шаговым двигателем по углу поворота его вала ротора; на основе этих моделей получена линеаризованная модель использующая предварительно полученную нагрузочную характеристику шагового привода (привод состоит из шагового двигателя и управляющего драйвера). **Результаты:** выполнено сравнение модели гибридного шагового двигателя и линеаризованной модели на возможность отработки необходимого угла поворота ротора, а также отработки аварийного режима пропуска шагов при нагрузке, превышающей максимальные значения. **Практическая значимость:** полученные результаты сравнения показали, что для синтеза системы управления нет необходимости использовать полную модель шагового двигателя, при имеющихся технических характеристиках уже существующего шагового привода достаточно обойтись упрощённой моделью.

Ключевые слова: шаговый двигатель, гибридный шаговый двигатель, математическая модель, линеаризованная модель, способ управления.

B.V. Kavalеров, D.V. Falaleev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

LINEARIZATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF A HYBRID STEPPER MOTOR

An important feature of mathematical models is the fact that it is possible to simplify their mathematical description. This is done not only because of this possibility, but also because of the need to increase its speed. The simpler the model, the faster the calculation of variables is, the easier it is to algorithmize. Simplification is a complex and important stage of model development, because it requires understanding of the main processes in the object under study. Purpose of work: to investigate the possibility of replacing the hybrid stepper motor model with a linearized stepper motor model to use this

model in control system synthesis procedures. Methods: the mathematical model of hybrid stepper motor on the basis of Lagrange-Maxwell mathematical models has been investigated; the model of feedback system on the rotor position has been developed for possibility to control stepper motor by the angle of rotation of its rotor shaft; on the basis of these models the linearized model using the previously obtained load characteristic of stepper drive (drive consists of stepper motor and control driver) has been obtained. Results: the model of hybrid stepper motor and linearized model have been compared for the possibility of working out the necessary angle of rotation of the rotor, as well as working out the emergency mode of skipping steps when the load exceeds the maximum values. Practical significance: the obtained comparison results showed that for the synthesis of the control system there is no need to use a complete model of a stepper motor, with the available technical characteristics of the already existing stepper drive it is enough to make do with a simplified model.

Keywords: stepper motor, hybrid stepper motor, mathematical model, linearized model, control method.

Введение

В современных системах управления используются устройства, имеющие дискретный характер управления. Использование импульсных систем управления способствует увеличению числа устройств, в которых можно использовать шаговые двигатели.

Шаговые двигатели (ШД) получили широкое распространение, в частности, за счет дискретного характера поворота ротора с возможностью фиксации его в заданном положении, без необходимости использования устройств обратной связи. Наибольшее распространение имеют гибридные шаговые двигатели (ГШД). При создании технических объектов необходимо использовать математические модели для сокращения затрат при разработке новых систем управления и облегчения интеграции в уже существующие системы управления.

В настоящее время существует множество различных подходов к математическому моделированию ШД [1–4]. Наиболее подробная модель ШД основана на обобщенной электрической машине, которая сводится к системе крайне нелинейных дифференциальных уравнений пятого порядка [5]. Данные, необходимые для моделирования, в большинстве случаев отсутствуют в открытом доступе. Кроме того, применение этой модели требует значительных временных затрат как на программирование, так и на расчет. Другим возможным вариантом модели ШД, может быть использование системы уравнений для обобщенной синхронной машины в системе координат d, q [6, 7], так как ШД относится к синхронным машинам [8, 9], но для использования этой модели характерны те же недостатки, что и для описанной ранее. В качестве альтернативного способа можно рассмотреть ШД как синхронный с дискретно вращающимся ротором [3, 10], аналитическое решение предложенной модели затруднительно, а для численного решения необходимо использовать до-

полнительные преобразования. Также в рассмотренных способах моделирования не учитывается нагрузочная характеристика, поскольку она зависит кроме прочего от используемого драйвера ШД [11].

Применение в системе управления готового технического исполнения шагового двигателя с соответствующим ему драйвером может быть нецелесообразно.

Цель данной работы разработать линеаризованную модель шагового двигателя, работающую в соответствии с нагрузочной характеристикой выбранного технического решения шагового двигателя.

1. Моделирование гибридного ШД и его система управления

1. В работах [12–15] представлен подход к описанию математических моделей на основе систем уравнений Лагранжа – Максвелла. Модель основана на формировании алгебраических и дифференциальных уравнений, в которых используются паспортные данные двигателя, которые имеются в открытом доступе. Кроме того, для управления данной моделью ШД достаточно подать сигнал напряжения определенной формы.

Как правило, данная модель включает в себя:

- 1) уравнения напряжений для каждой из фаз ГШД;
- 2) выражения для электромагнитного момента;
- 3) уравнения движения ротора под действием вращающего момента и момента статического сопротивления.

В качестве системы уравнений модели гибридного ШД возьмем представленную в работах отечественных и зарубежных авторов [16–19] систему уравнений (1). Данная математическая модель ШД приводится для неподвижной системы координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} [U_a - R_a i_a + k_m \omega \sin(p\theta)], \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_b} [U_b - R_b i_b - k_m \omega \cos(p\theta)], \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{j} [-k_m i_a \omega \sin(p\theta) + k_m i_b \omega \cos(p\theta) - k_d \sin(4p\theta) - M_c - B\omega], \\ N_R = p = \frac{360}{2m \cdot \theta}, \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega, \end{array} \right. \quad (1)$$

где i_a и i_b – токи в фазах, А; U_a и U_b – фазные напряжения, В; R_a , и R_b – сопротивление фаз, Ом; L_a и L_b – фазные индуктивности, Гн; k_m – постоянная крутящего момента двигателя, Нм/А; k_d – коэффициент фиксирующего момента; ω – скорость ротора, рад/с; p – число пар полюсов; N_R – количество зубьев ротора, в гибридном шаговом двигателе равняется числу пар полюсов; m – число фаз; θ – угол поворота ротора, рад; J – инерция ротора, кг·м²; B – постоянная вязкого трения, Нм/рад/с; M_c – момент нагрузки, Нм.

В исследуемой модели ГШД присутствует следующая система допущений [13]:

- 1) магнитная цепь электрической машины линейна, насыщение магнитопровода не учитывается, падение магнитного напряжения отсутствует;
- 2) сердечники считаются гладкими, рабочий зазор – равномерным;
- 3) учитываются только основные гармоники тока, магнитодвижущей силы (МДС), потока и ЭДС;
- 4) взаимная индуктивность обмоток не учитывается;
- 5) влияние вихревых токов в магнитопроводе не учитывается.

Фиксирующий момент – $k_d \sin(4p\theta)$ из-за магнитного взаимодействия постоянного магнита зубцов ротора с зубцами статора. Обычно $k_d = 1-10\%$ от крутящего момента или значения $k_m \cdot i_o$, где i_o номинальный ток [18]. Постоянная крутящего момента k_m определяется выражением [16, 20]:

$$k_m = \frac{M_{\max}}{I_{\max}}. \quad (2)$$

где M_{\max} – максимальный крутящий момент; I_{\max} – максимальный фазный ток.

На рис. 1 изображена схема двухфазного шагового двигателя в соответствии с системой уравнений (1).

При моделировании управления вместо поэлементного воссоздания электрической схемы драйвера использован блок формирования входного сигнала (БФВС), который с помощью систем уравнений (4) для полношагового и (5) для микрошагового управления в зависимости от выбранного режима формирует сигнал напряжения с заданной частотой, подаваемый на входы фаз модели ШД.

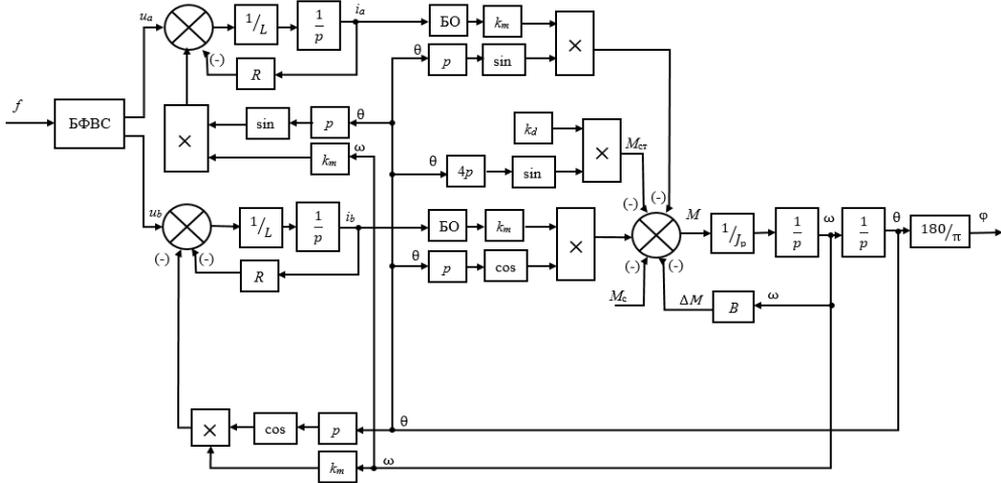


Рис. 1. Структура математической модели двухфазного гибридного шагового двигателя

В модели шагового двигателя (см. рис. 1) присутствует блок ограничения (БО) максимального тока фаз, который имеет зависимости (3). Ток, протекающий по обмоткам, должен быть ограничен, чтобы не превышать допустимую рассеиваемую мощность на активном сопротивлении, в противном случае может произойти выход двигателя из строя.

$$\left\{ \begin{array}{ll} i_{in} < i_{min}, & i_{out} = i_{min}, \\ \text{Если} & \text{то} \\ i_{in} > i_{max}, & i_{out} = i_{max}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где i_{in} – входное значение тока фазы, А; i_{out} – выходное значение тока фазы, А; i_{min} – минимальное значение тока фазы, А; i_{max} – максимальное значение тока фазы, А.

При моделировании были использованы параметры стандартного ШД типоразмера NEMA 34 [21].

Уравнения БФВС для полношагового управления приведены в системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{A-A'} = U \cdot \operatorname{sgn} \left(\cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot f \cdot t \right) \right), \\ u_{B-B'} = U \cdot \operatorname{sgn} \left(\sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot f \cdot t \right) \right), \end{array} \right. \quad (4)$$

где $u_{A-A'}$ – напряжение фазы A, B ; $u_{B-B'}$ – напряжение фазы B, B ; U – напряжение питания драйвера, В; $\text{sgn}(x)$ – сигнум, кусочно-постоянная функция действительного аргумента, имеет систему определения (5); f – частота напряжения питания, Гц.

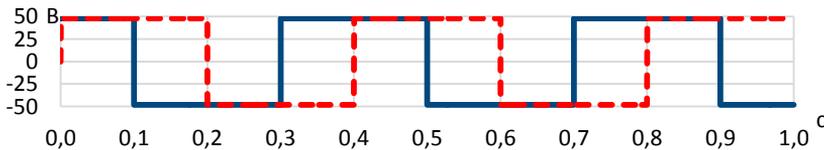
$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 2, а изображена форма сигнала напряжения при полношаговом режиме работы [13, 16, 22], частота питания $f = 10$ Гц и напряжение питания $U = 48$ В. Уравнения БФВС для микрошагового управления приведены в системе уравнений:

$$\begin{cases} u_{A-A'} = U \cdot q \cdot \text{round} \left(\frac{\left(\cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot f \cdot t \right) \right)}{q} \right), \\ u_{B-B'} = U \cdot q \cdot \text{round} \left(\frac{\left(\sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot f \cdot t \right) \right)}{q} \right), \end{cases} \quad (6)$$

где $u_{A-A'}$ – напряжение фазы A, B ; $u_{B-B'}$ – напряжение фазы B, B ; U – напряжение питания драйвера, В; q – шаг квантования (дробление шага); f – частота напряжения питания, Гц; $\text{round}(x)$ – возвращает округленные до ближайшего целого элемента массива x .

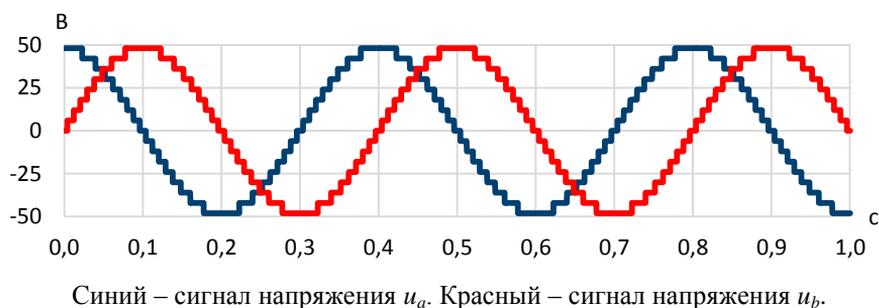
На рис. 2, б изображена форма сигнала напряжения для микрошагового управления [11, 23], при частоте питания $f = 10$ Гц, напряжении питания $U = 48$ В, с микрошаговым дроблением $q = 1/8$.



Синий – сигнал напряжения u_a . Красный пунктир – сигнал напряжения u_b

а

Рис. 2. Формы сигнала напряжения при полношаговом и микрошаговом управлении



б

Рис. 2. Окончание

На рис. 3 дано сравнение графиков угла поворота вала ШД при полношаговом и микрошаговом управлении [24].

При запуске двигателя с большой частотой питания необходимо применение искусственного плавного нарастания частоты, для того чтобы двигатель не пропускал шаги из-за резкого старта на большой частоте. Одна из возможных моделей задатчика интенсивности приведена в уравнении:

$$f(t) = f_0 \cdot \tanh(k \cdot t), \quad (7)$$

где f – частота питания обмоток шагового двигателя, Гц; f_0 – желаемая частота питания обмоток шагового двигателя, Гц; $\tanh(x)$ – функция гиперболического тангенса; k – коэффициент, влияющий на время достижения желаемой частоты.

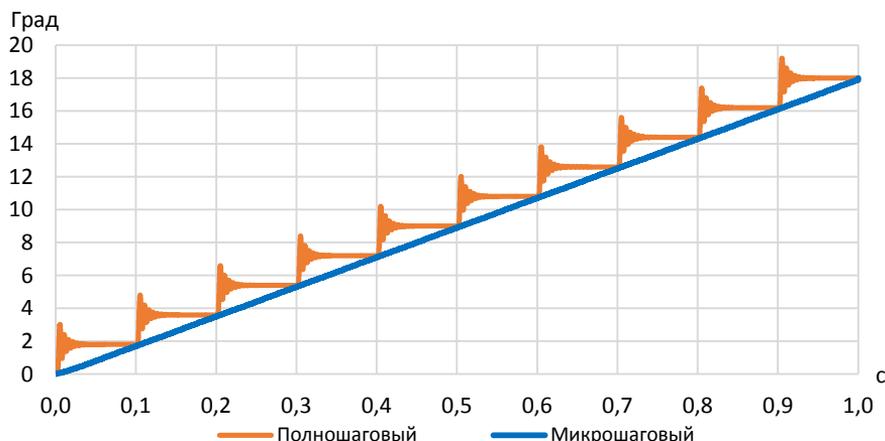


Рис. 3. Сравнительный график изменения угла поворота вала ШД

На рис. 4 изображена нагрузочная характеристика ШД. Определение максимального момента сопротивления M_c проводилось с помощью наброса момента сопротивления ступенчатым воздействием в момент времени, равный 1,25 с, итерационно увеличивая до тех пор, пока не произойдет пропуск шагов.

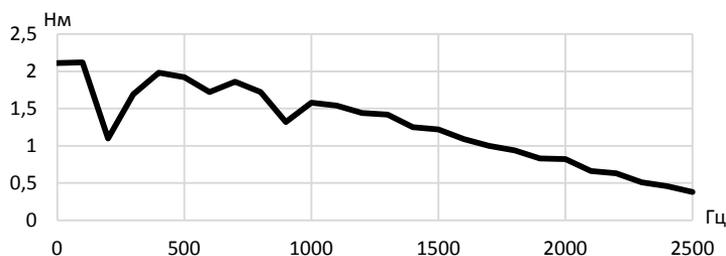


Рис. 4. Нагрузочная характеристики ШД

Нагрузочную характеристику можно разделить на несколько областей. При низкой частоте питания, до 100 Гц, ток быстро устанавливается в обмотках и остается около своего номинального значения [9].

Резкие провалы крутящего момента возникают во многих системах с ШД и вызваны механическим резонансом [9, 14]. Способом борьбы с данным явлением может быть использование специальных схем систем управления, содержащих демпфирующие контроллеры [25].

Для высоких частот питания двигателя постоянная времени нарастания и спада тока становится значительной частью общего времени возбуждения фазы. Фазный ток уменьшается относительно номинального значения, тем самым снижая крутящий момент [9, 26].

Для возможности управления ШД по углу поворота вала ШД в модель была добавлена обратная связь (ОС), по положению ротора, которая имитирует систему управления обработки заданного угла поворота ротора. Для придания плавности останова ШД необходимо при приближении к желаемому углу поворота плавно снижать частоту питания. Для этого необходимо наличие в ОС регулятора. В качестве регулятора применим пропорциональный (П)-регулятор, значение коэффициента $k_p = 27,774$, с настройкой на модульный оптимум (МО).

Для настройки на модульный оптимум используется фильтр (8) в виде апериодического звена, постоянная времени которого (T_ϕ) определяет быстродействие настройки на МО и плавность замедления ШД перед остановкой.

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi}p + 1} = \frac{1}{0,01p + 1}. \quad (8)$$

2. Линеаризация математической модели ШД

Если в разрабатываемой системе известно, какой будет применяться электрический шаговый привод, который содержит в себе помимо ШД еще и управляющий драйвер, с известной нагрузочной характеристикой, в этом случае имеет смысл использовать упрощенную модель ШД, структурная схема которой изображена на рис. 5.

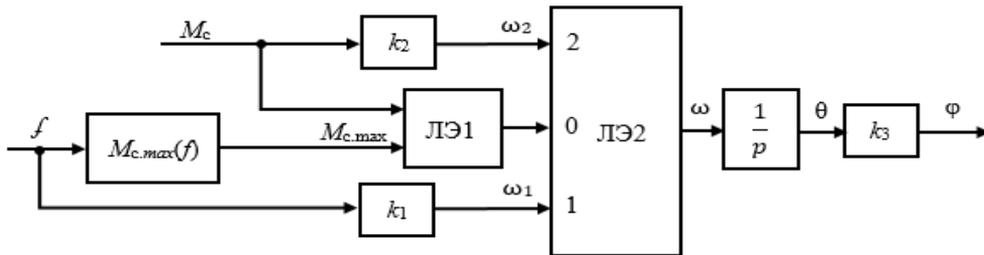


Рис. 5. Структура линеаризованной математической модели ШД

На рис. 5 приняты следующие обозначения:

- 1) f – частота питания ШД, Гц;
- 2) M_c – момент сопротивления, Нм;
- 3) $M_{c,max}(f)$ – максимальный момент сопротивления, зависящий от частоты питания, нагрузочная характеристика, полученная ранее;
- 4) $M_{c,max}$ – максимальный момент сопротивления, Нм;
- 5) ω – угловая скорость, рад/с;
- 6) θ – угол поворота вала в радианах, рад;
- 7) ϕ – угол поворота вала, град;
- 8) k_1 – коэффициент, преобразующий частоту питания в угловую скорость, соответствует одному шагу ШД в радианах;
- 9) k_2 – коэффициент пропорциональной зависимости угловой скорости от момента, при срыве;
- 10) k_3 – коэффициент, преобразующий угол поворота в радианах в угол поворота в градусах;
- 11) ЛЭ1 – логический элемент 1. Если M_c больше $M_{c,max}$ то на выходе «1», иначе «0»;
- 12) ЛЭ2 – логический элемент 2, представляющий собой переключатель, имеющий три входа и один выход:

- 1) вход 0 – управляет переключением;
- 2) вход 1 – является нормально замкнутым с выходом;
- 3) вход 2 – является нормально разомкнутым с выходом.

При подаче 1 на вход 0 происходит переключение выходного сигнала с входа 1 на вход 2.

Значение коэффициента k_2 определяется экспериментально. Угловая скорость после наброса M_c больше $M_{c,max}$ зависит как от частоты, питания, так и от момента сопротивления при набросе, но от момента сопротивления зависимость кратно больше, чем от частоты питания, поэтому для двух частот 2000 и 2500 Гц было проведено по 4 эксперимента с набросом $M_c = 1, 1.5, 2, 3$. В результате было определено приблизительное отношение установившегося действующего значения угловой скорости после наброса к моменту наброса.

Вследствие того, что угловая скорость модели ГШД на основе системы уравнений Лагранжа – Максвелла имеет нелинейную форму, с помощью уравнения (9) определялось среднеквадратичное значение:

$$\omega_{скз} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \omega^2 dt}, \quad (9)$$

где $\omega_{скз}$ – среднеквадратичное значение угловой скорости, рад/с; ω – угловая скорости, рад/с; T – период, с.

Уравнения, описывающие линеаризованную модель (ЛМ) ШД, зависят от момента сопротивления нагрузки M_c . Если приложенный момент сопротивления нагрузки M_c меньше или равен максимальному моменту сопротивления $M_{c,max}$, то используется система уравнения (10), иначе – если момент сопротивления нагрузки M_c больше максимального момента сопротивления $M_{c,max}$, то используется система уравнений (11):

$$\begin{cases} \omega_1 = f \cdot k_1, \\ \varphi = \theta \cdot k_3, \\ \omega = \frac{d\theta}{dt}, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \omega_2 = M_c \cdot k_2, \\ \varphi = \theta \cdot k_3, \\ \omega = \frac{d\theta}{dt}. \end{cases} \quad (11)$$

Для рассматриваемого двигателя получились следующие значения коэффициентов:

- 1) $k_1 = 1,8 \cdot \pi / 180 \approx 0,03142$;
- 2) $k_2 = -39$;
- 3) $k_3 = 180/\pi \approx 57,2958$.

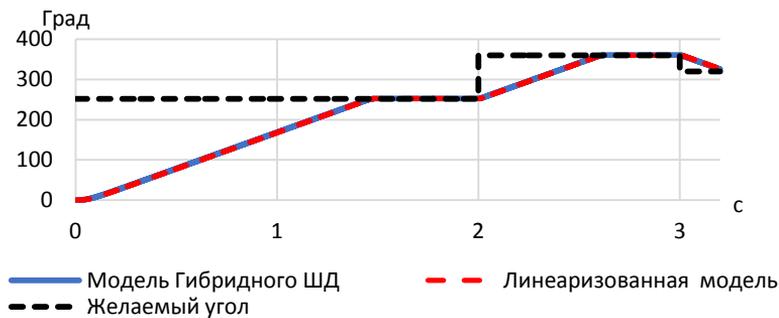
3. Сравнение математических моделей ШД

Произведем сравнение полученной ЛМ ШД с моделью ГШД, а также проверим работу разработанной системы ОС по положению.

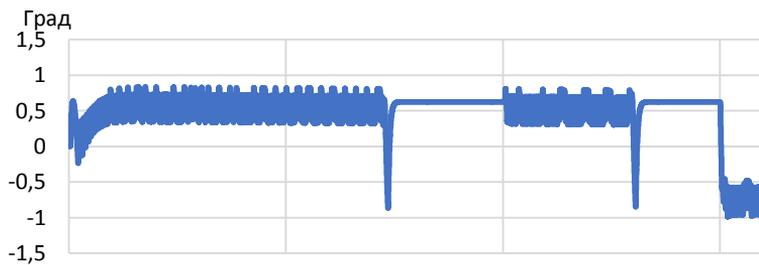
Для сравнения зададим для модели ГШД полношаговый способ управления. Частота питания $f = 100$ Гц, что является общим для исследуемых моделей.

На рис. 6, а изображен график задания желаемого угла поворота вала ШД, а также графики отработки сигнала задания моделями ГШД и ЛМ.

Разность между значениями угла поворота гибридной и линеаризованной моделей ШД в зависимости от момента времени приведена на рис. 6, б.



а



б

Рис. 6. Графики сравнения моделей ГШД и ЛМ при отработке желаемого угла задания

Из рис. 6, а видно, что с помощью системы ОС по положению есть возможность управлять изменением угла поворота моделей ШД при различных изменениях значений желаемого угла поворота.

Из рис. 6, б можно отметить, что разность положения ротора между исследуемыми моделями не превышает величины одного шага (1,8 град.). Колебания разности угла поворота во время вращения вала ШД на рис. 6 объясняется тем, что модель ГШД отражает физические процессы [17, 20, 27], протекающие при моделировании.

Проведем для частоты $f = 1000$ Гц, эксперимент со ступенчатым набросом момента сопротивления $M_c = 1,6$ Нм, что является больше максимально допустимого для выбранной частоты. На рис. 7 приведен сравнительный график изменения угла поворота вала ШД.

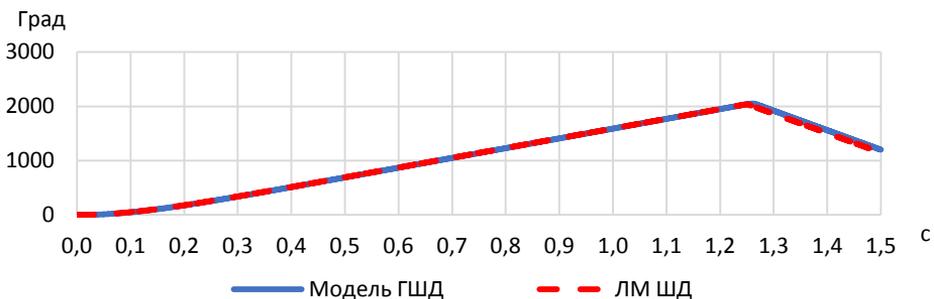


Рис. 7. Сравнительный график угла поворота в градусах

Основываясь на приведенных рис. 6 и 7, можно сделать вывод, что ЛМ способна работать в соответствии с нагрузочной характеристикой, которая была получена для модели ГШД. Несмотря на то, что после наброса момента сопротивления присутствует небольшое расхождение графиков, область после начала пропуска шагов является нерабочей.

Заключение

Результаты сравнения линеаризованной модели шагового двигателя с моделью гибридного шагового двигателя на основе системы уравнений Лагранжа – Максвелла демонстрируют, что использование ЛМ в случае, если имеются технические характеристики предполагаемого к использованию в системах управления шагового привода, показывает достаточную точность, а также способно качественно повторять аварийный режим работы при приложении к валу ШД нагрузки больше допустимой.

Для возможности управления моделями ШД добавлена система управления с обратной связью по положению, содержащая П-регулятор с настройкой на модульный оптимум.

Практическим применением является возможность синтеза систем управления по полученной линеаризованной модели. Кроме того, полученная линеаризованная модель предложена для программирования на языке Java с целью внедрения в программный продукт «EnergyDesc».

Библиографический список

1. Денисов В.А., Жуков А.В. Математическое моделирование работы шагового двигателя в составе мехатронного модуля компенсации износа режущего инструмента // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 6. – С. 54–58.

2. Красовский А.Б. Способ повышения быстродействия шагового электропривода // Электронный научно-технический журнал. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – № 9. – С. 511–518.

3. Кулинченко Г.В., Багута В.А., Коробов А.Г. Оценка характеристик мехатронного модуля на базе шагового двигателя // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2013. – № 51. – С. 43–53.

4. Karadeniz A.M., Alkayyali M., Szemes P.T. Modelling and Simulation of Stepper Motor For Position Control Using LabVIEW // Recent Innovations in Mechatronics. – 2018. – Vol. 5, № 1. DOI: 10.17667/riim.2018.1/7

5. Солоха А.А. Квазиоптимизация быстродействия при управлении позиционированием шагового двигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.13.01) / ДГТУ. – Ростов-н/Д, 2006. – 22 с.

6. Семисалов В.В. Разработка математической модели для исследования динамических режимов работы шагового электропривода с трехфазным инвертором напряжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.09.03) / Моск. гос. авиац. ин-т. – М., 2005. – 24 с.

7. Lekomtsev P.V. Discrete model of hybrid stepper motor by optimal state space control // IOP Conference Series Materials Science and Engineering 971. – 2020. – P. 1–6. DOI:10.1088/1757-899X/971/5/052022

8. Усольцев А.А. Электрические машины автоматических устройств: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2011. – 213 с.

9. Acamley P. Stepping Motors a guide to theory and practice // 4th edition. – Milton Keynes U.K.: Lightning Source UK Ltd 2007. – 158 p.

10. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.

11. Фортунa В., Сергеев С. Микрошаговый режим работы шагового двигателя, дробление шага [Электронный ресурс] // Электропривод. – URL: https://electroprivod.ru/microstepping_mode.htm (дата обращения: 25.09.2021).

12. Горячев О.В., Ефромеев А.Г., Степочкин А.О. Разработка нелинейной математической модели гибридного шагового двигателя на основе анализа магнитного поля машины // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – № 12. – Ч. 3. – С. 9–27.

13. Степочкин А.О. Моделирование работы шагового электрического двигателя гибридного типа в пакете Simulink // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – С. 308–315.

14. Samokhvalov D., Stoliarov S., Kekkonen A. The Hybrid Stepper Motor Modeling in Simulink // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRusNW); Saint Petersburg, 2–4 February 2015.

15. Alhinqari A., Alhinqari A. Simulation of Stepper Motor Motion and Control // 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA. – 2021. – P. 573–578. DOI: 10.1109/MI-STA52233.2021.9464460

16. Аверин С.В., Коваленко И.М., Шевцов Д.А. Модель двухфазного гибридного униполярного шагового двигателя для анализа работы систем авиационной автоматики // Практическая силовая электроника. – 2015. – № 3 (59). – С. 43–46.

17. Baldha S., Shukla J., Tarpara K. Design and Simulation of Two-Phase Hybrid Stepper Motor with Current Tracking // National Conference on Emerging Trends in Computer, Electrical & Electronics (ETCEE); International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD). – 2015.

18. Chandran K., Mathew A. Simulation of Stepper Motor using Quasi Square Wave Input Input // IJERT International Journal of Engineering Research & Technology. – June 2016. – Vol. 5, iss. 06. – P. 321–325.

19. Rybarczyk D. Investigation of Electrohydraulic Valve with the Stepper Motor // AIP Conference Proceedings 2029. – 2018. – 020068 p.

20. Fedak V., Zaskalicky P. Support for Learning of Dynamic Performance of Electrical Rotating Machines by Virtual Models // IntechOpen. – October 21st. – 2015. – URL: <https://www.intechopen.com/books/e-learning-instructional-design-organizational-strategy-and-management/support-for-learning-of-dynamic-performance-of-electrical-rotating-machines-by-virtual-models> (дата обращения: 16.09.2021).

21. НПО АТОМ, Шаговые двигатели FL86STH [Электронный ресурс]. – URL: http://www.npoatom.ru/katalog/step_motor/fl86sth/ (дата обращения: 25.09.2021).

22. Mihalache G., Livint G., Horga V. A New Method for Modeling and Control of Hybrid Stepper Motors // Analele universităţii “EFTIMIE MURGU” REŞIŢA ANUL XXI, NR. 3. – 2014. – P. 13–24.

23. Петросян Н., Ширинян П. Контроллер микрошагового управления двухфазным шаговым двигателем с электрическим дроблением основного шага // Силовая электроника. – 2014. – № 4. – С. 50–54.

24. Vernezi A.M., Nazarenko V.D., Abderrazzak H.E., Vibration Suppression of Stepper Motors by the Electric Method // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2021. – P. 566–570. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446366

25. Le M.K., Hoang V.H., Jeon W.J. An Advanced Closed-Loop Control to Improve the Performance of Hybrid Stepper Motors // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. 32, № 9. – P. 7244–7255. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623341

26. Чиликин М.Г. Дискретный электропривод с шаговым двигателем. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.

27. Разработка системы управления шаговым двигателем в среде MatLab/Simulink с последующей генерацией исполняемого кода в микроконтроллер STM32F4 / А.П. Яковлев, Д.А. Василенко, Г.С. Устиновский, Р.С. Гаврилов // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XLIV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2021. – С. 100–105.

References

1. Denisov V.A., Zhukov A.V. Matematicheskoe modelirovanie raboty shagovogo dvigatelya v sostave mekhatronnogo modulia kompensatsii iznosa rezhushchego instrumenta [Mathematical modeling of a stepper motor as part of

a mechatronic cutting tool wear compensation module]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 6, pp. 54-58.

2. Krasovskii A.B. Sposob povysheniia bystrodeistviia shagovogo elektroprivoda [A way to increase the speed of the stepper electric drive]. *Elektronnyi nauchno-tehnicheskii zhurnal*. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2013, no. 9, pp. 511-518.

3. Kulinchenko G.V., Baguta V.A., Korobov A.G. Otsenka kharakteristik mekhatronnogo modul'ia na baze shagovogo dvigatel'ia [Performance evaluation of a mechatronic module based on a stepper motor]. *Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu "KhPI". Problemi udoskonalennia elektrichnikh mashin i aparativ*, 2013, no. 51, pp. 43-53.

4. Karadeniz A.M., Alkayyali M., Szemes P.T. Modelling and Simulation of Stepper Motor for Position Control Using LabVIEW. *Recent Innovations in Mechatronics*, 2018, vol. 5, no. 1. DOI: 10.17667/riim.2018.1/7

5. Solokha A.A. Kvazioptimizatsiia bystrodeistviia pri upravlenii pozitsionirovaniem shagovogo dvigatel'ia [Quasi-optimization of the speed performance in stepper motor positioning control]. Abstract of Ph. D. thesis. Rostov-na-Donu, 2006, 22 p.

6. Semisalov V.V. Razrabotka matematicheskoi modeli dlia issledovaniia dinamicheskikh rezhimov raboty shagovogo elektroprivoda s trekhfaznym invertorom napriazheniia [Development of a mathematical model to study the dynamic modes of operation of a stepper electric drive with a three-phase voltage inverter]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi aviatsionnyi institut. 2005, 24 p.

7. Lekomtsev P.V. Discrete model of hybrid stepper motor by optimal state space control. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering 971*, 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1088/1757-899X/971/5/052022

8. Usol'tsev A.A. Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustroistv [Electrical machines of automatic devices]. Saint Petersburg: Sankt Peterburgskii gosudarstvennyi universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki, 2011, 213 p.

9. Acamley P. Stepping Motors a guide to theory and practice. *4th edition*. Milton Keynes U.K.: Lightning Sourse UK Ltd 2007, 158 p.

10. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskii G.G. Upravlenie elektroprivodami [Electric drive control]. Leningrad: Energoizdat, Leningr. otdelenie, 1982, 392 p.

11. Fortuna V., Sergeev S. Mikroshagovyi rezhim raboty shagovogo dvigatel'ia, droblenie shaga [Microstepping mode of the stepper motor, split step]. *Elektroprivod*, available at: https://electroprivod.ru/microstepping_mode.htm (accessed 25 September 2021).

12. Goriachev O.V., Efromeev A.G., Steepochkin A.O. Razrabotka nelineinoi matematicheskoi modeli gibridnogo shagovogo dvigatel'ia na osnove analiza magnitnogo polia mashiny [Development of a nonlinear mathematical model of a hybrid stepper motor based on the analysis of the magnetic field of the machine]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 12, part. 3, pp. 9-27.

13. Steepochkin A.O. Modelirovanie raboty shagovogo elektricheskogo dvigatel'ia gibridnogo tipa v pakete Simulink [Modeling of a hybrid stepper motor in Simulink]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, pp. 308-315.

14. Samokhvalov D., Stoliarov S., Kekkonen A. The Hybrid Stepper Motor Modeling in Simulink. *IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*, Saint Petersburg, 2-4 February 2015.

15. Alhinqari A., Alhinqari A. Simulation of Stepper Motor Motion and Control. *1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA*, 2021, pp. 573-578. DOI: 10.1109/MI-STA52233.2021.9464460

16. Averin S.V., Kovalenko I.M., Shevtsov D.A. Model' dvukhfaznogo gibridnogo unipoliarnogo shagovogo dvigatel'ia dlia analiza raboty sistem aviatsionnoi avtomatiki [Model of a two-phase hybrid unipolar stepper motor for analyzing the operation of aviation automation systems]. *Prakticheskaiia silovaia elektronika*, 2015, no. 3 (59), pp. 43-46.

17. Baldha S., Shukla J., Tarpara K. Design and Simulation of Two-Phase Hybrid Stepper Motor with Current Tracking. *National Conference on Emerging Trends in Computer, Electrical & Electronics (ETCEE); International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD)*, 2015.

18. Chandran K., Mathew A. Simulation of Stepper Motor using Quasi Square Wave Input Input. *IJERT International Journal of Engineering Research & Technology*. June 2016, vol. 5, iss. 06, pp. 321-325.

19. Rybarczyk D. Investigation of Electrohydraulic Valve with the Stepper Motor. *AIP Conference Proceedings 2029*, 2018, 020068 p.

20. Fedak V., Zaskalicky P. Support for Learning of Dynamic Performance of Electrical Rotating Machines by Virtual Models. *IntechOpen*. October 21st, 2015, available at: <https://www.intechopen.com/books/e-learning-instructional-design-organizational-strategy-and-management/support-for-learning-of-dynamic-performance-of-electrical-rotating-machines-by-virtualmodels> (accessed 25 September 2021).

21. NPO ATOM, Shagovye dvigateli FL86STH [NPO ATOM, Stepper motors FL86STH], available at: http://www.npoatom.ru/katalog/step_motor/fl86sth/ (accessed 25 September 2021).

22. Mihalache G., Livint G., Horga V. A New Method for Modeling and Control of Hybrid Stepper Motors. *Analele universității "EFTIMIE MURGU" REȘIȚA ANUL XXI, NR. 3*, 2014, pp. 13-24.

23. Petrosian N., Shirinian P. Kontroller mikroshagovogo upravleniia dvukhfaznym shagovym dvigatelem s elektricheskim drobieniem osnovnogo shaga [Microstepping controller for two-phase stepper motor with electric crushing of the main step]. *Silovaia elektronika*, 2014, no. 4, pp. 50-54.

24. Vernezi A.M., Nazarenko V.D., Abderrazzak H.E., Vibration Suppression of Stepper Motors by the Electric Method. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, 2021, pp. 566-570. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446366

25. Le M.K., Hoang V.H., Jeon W.J. An Advanced Closed-Loop Control to Improve the Performance of Hybrid Stepper Motors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 9, pp. 7244-7255. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2623341

26. Chilikin M.G. Diskretnyi elektroprivod s shagovym dvigatelem [Discrete stepper motor drive]. Moscow: Energiia, 1971, 624 p.

27. Iakovlev A.P., Vasilenko D.A., Ustinovskii G.S., Gavrilov R.S. Razrabotka sistemy upravleniia shagovym dvigatelem v srede MatLab/Simulink s posleduiushchei generatsiei ispolniaemogo koda v mikrokontroller STM32F4 [Development of a stepper motor control system in MatLab/Simulink with subsequent generation of executable code into the STM32F4 microcontroller]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniia: aktual'nye voprosy, dostizheniia i innovatsii. Sbornik statei XLIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Penza, 2021, pp. 100-105.

Сведения об авторах

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

Фалалеев Дмитрий Викторович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: falaleev6@inbox.ru).

About the authors

Boris V. Kavalerov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Electrical Engineering and Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Dmitry V. Falaleev (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Electrical Engineering and Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: falaleev6@inbox.ru).

Получено 25.10.2021