

DOI 10.5862/JEST.254.17

УДК 62.503.51:62.503.54:62.503.55

*А.С. Ляпин*

## **МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

*A.S. Lyapin*

### **MODEL STUDY OF A DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE WITH FREQUENCY CONTROL**

Перечислены наиболее перспективные области применения машины двойного питания (МДП). Получено выражение для вектора напряжения ротора МДП с частотным управлением, а также представлены уравнения, необходимые для создания математической модели такой машины. Выведены выражения для модуля вектора напряжения ротора применительно к двум вариантам работы МДП, а именно: 1) с постоянной активной мощностью статора во всем диапазоне изменения скольжения; 2) с постоянной реактивной мощностью в ограниченном диапазоне изменения скольжения. С помощью пакета Matlab построены статические характеристики МДП с частотным управлением. Выполнен анализ статических характеристик.

**МАШИНА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ; ЧАСТОТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ; СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ПОСТОЯННАЯ МОЩНОСТЬ.**

The subject of this study is a doubly-fed induction machine with frequency control. We have described the most promising areas of application doubly-fed induction machine. The resulting equation for the voltage vector of the rotor of a doubly-fed induction machine with frequency control. We have listed the equations required to create the mathematical model of the doubly-fed induction machine with frequency control. We described the process of obtaining the expressions for the module of the voltage vector of the rotor, ensuring the operation of the doubly-fed induction machine with a constant active power of the stator throughout the entire range of slip variation. We have obtained an expression for the module of the voltage vector of the rotor, ensuring the operation of the doubly-fed induction machine with a constant reactive power in a limited slip variation range. The static characteristics of the doubly-fed induction machine with frequency control were constructed in MATLAB. A analysis of static characteristics was performed.

**DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE; FREQUENCY CONTROL; STATIC CHARACTERISTICS; MATHEMATICAL MODEL; CONSTANT POWER.**

#### **Введение**

Конструкция фазного ротора асинхронного двигателя была запатентована в 1890 году русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским [1, 2]. Машина двойного питания (МДП) – это асинхронный двигатель с фазным ротором, статорные обмотки которого подключены непосредственно к сети переменного напряжения, а роторные обмотки питаются от полупроводникового преобразователя частоты. Электроприводы на основе

МДП обладают такими достоинствами, как высокое быстродействие, возможность регулирования коэффициента мощности в сети, пропорциональность мощности управления скольжению, возможность реализации двузонного регулирования [3].

Применение электроприводов с МДП перспективно в судовых валогенераторных установках [4], нагрузочных устройствах испытания двигателей внутреннего сгорания, малых гидроэлектростанциях, ветрогенераторах [5].

Разработка теории применения МДП началась в середине прошлого века [6]. Основы теории отражены в работах советских и российских ученых М.М. Ботвинника, Ю.Г. Шакаряна, Н.Н. Блоцкого, И.А. Лабунец, О.С. Хватова и других [7–12]. Результаты теоретических исследований МДП были подтверждены на промышленных установках большой мощности, созданных в СССР [13, 14]. На момент создания теоретических основ использования МДП не существовало средств компьютерного моделирования, позволяющих разрабатывать модели и производить исследования всевозможных режимов МДП.

Изучение современных источников, в которых рассмотрены теоретические вопросы МДП, позволяет сделать вывод о том, что как в отечественных, так и в зарубежных публикациях в основном представлены результаты исследования динамических характеристик МДП. В них отсутствуют исследования статических характеристик МДП при различных способах управления, математические, структурные и виртуальные модели МДП [15]. Между тем создание компьютерных моделей МДП для проведения теоретических исследований на современном уровне – необходимый этап на пути к широкому применению высокоэффективных приводов с машиной двойного питания.

Цели данной статьи – формулирование закона, по которому должен изменяться вектор напряжения ротора МДП при частотном управлении, а также получение на математической модели, разработанной в среде Matlab, статических характеристик машины и их анализ.

**Уравнения, необходимые для создания математической модели машины двойного питания с частотным управлением**

Частотное управление МДП заключается в поддержании постоянным отношения модуля вектора напряжения ротора к частоте этого напряжения:

$$\frac{|U_2|}{f_2} = n = \text{const}, \tag{1}$$

где  $f_2$  – частота напряжения ротора;  $n$  – вещественное число;  $|U_2|$  – модуль вектора напряжения ротора.

Частота напряжения ротора выражается через скольжение и частоту напряжения статора следующим образом:

$$f_2 = s f_1, \tag{2}$$

где  $f_1$  – частота напряжения статора;  $s$  – скольжение.

С учетом выражения (2) равенство (1) может быть преобразовано к виду

$$|U_2| = n s f_1. \tag{3}$$

Таким образом, при частотном управлении МДП по цепи ротора вектор напряжения ротора будет изменяться согласно выражению

$$U_2 = |U_2|(\cos \varphi + j \sin \varphi) = n s f_1 (\cos \varphi + j \sin \varphi), \tag{4}$$

где  $\varphi$  – угол между вектором напряжения ротора и осью системы координат  $x, y$ ;  $U_2$  – вектор напряжения ротора МДП.

При рассматриваемой схеме включения машины двойного питания обмотки статора подключены непосредственно к сети трехфазного напряжения. Поэтому частота напряжения статора  $f_1$  постоянна. Тогда из уравнения (4) следует, что вектор напряжения ротора при заданном скольжении определяется только значением параметра  $n$  и угла  $\varphi$ . Таким образом, частотное управление МДП по цепи ротора может осуществляться путем изменения требуемым образом значений параметра  $n$  и угла  $\varphi$ .

В статье [16] были получены следующие уравнения, необходимые для создания математической модели МДП:

$$\begin{aligned} i_{1pu} &= \frac{1}{R_{1pu} R_{2pu} [1 - s T_1 T_2 \sigma + j(T_1 + s T_2)]} \times \\ &\times [R_{2pu} U_{1pu} + j(R_{2pu} T_2 s U_{1pu} - L_{mpu} U_{2pu})]; \\ i_{2pu} &= \frac{1}{R_{1pu} R_{2pu} [1 - s T_1 T_2 \sigma + j(T_1 + s T_2)]} \times \\ &\times [R_{1pu} U_{2pu} + j(R_{1pu} T_1 U_{2pu} - L_{mpu} s U_{1pu})]; \\ P_{1pu} &= 1,5 U_{1xpu} i_{1xpu}; \quad Q_{1pu} = -1,5 U_{1xpu} i_{1ypu}; \\ M &= 1,5 p L_{mpu} (i_{1ypu} i_{2xpu} - i_{1xpu} i_{2ypu}); \\ \Delta P &= 1,5 (R_{1pu} |i_{1pu}|^2 + R_{2pu} |i_{2pu}|^2); \\ P_{2pu} &= 1,5 (U_{2xpu} i_{2xpu} + U_{2ypu} i_{2ypu}); \\ Q_{2pu} &= 1,5 (U_{2ypu} i_{2xpu} - U_{2xpu} i_{2ypu}), \end{aligned} \tag{5}$$

где  $i_{1pu}, i_{2pu}$  – векторы токов статора и ротора;  $R_{1pu}, R_{2pu}$  – активные сопротивления соответственно статора и ротора;  $s$  – скольжение;  $T_1, T_2$  – постоянные времени статора и ротора;  $U_{1pu}, U_{2pu}$  – векторы напряжения статора и ротора;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния;  $L_{mru}$  – главная индуктивность намагничивающего контура;  $i_{1xpu}, i_{1yru}, U_{1xpu}, U_{1yru}$  – проекции векторов тока и напряжения статора на оси  $x, y$ ;  $i_{2xpu}, i_{2yru}, U_{2xpu}, U_{2yru}$  – проекции векторов тока и напряжения ротора на оси  $x, y$ ;  $P_{1pu}, Q_{1pu}, P_{2pu}, Q_{2p}$  – активные и реактивные мощности статора и ротора;  $p$  – число пар полюсов;  $M$  – электромагнитный момент;  $\Delta P$  – мощность потерь в меди МДП.

Для придания результатам исследования большей наглядности переменные в уравнениях системы (5) записаны в относительных единицах (per unit). Вектор напряжения статора при вы-

воде уравнений ориентирован по оси  $x$  системы координат  $x, y$ , вращающейся с синхронной частотой ( $U_{1xpu} = |U_{1xpu}|, U_{1yru} = 0$ ).

Системы уравнений (5) и выражения (4) достаточно для создания в среде Matlab математической модели МДП при частотном управлении, с помощью которой будут получены статические характеристики машины.

На рис. 1 представлены результаты, полученные с помощью математической модели машины двойного питания мощностью 250 кВт. При моделировании значение угла  $\varphi$  принято равным  $-\frac{\pi}{10}$ , значение параметра  $n$  изменялось от 0,01 до 0,02 с шагом 0,005.

Из графика  $P_1 = f(s)$  видно, что только при значениях параметра  $n$  близких к величине 0,02 вид статических характеристик качественно меняется. При существенно меньших значениях

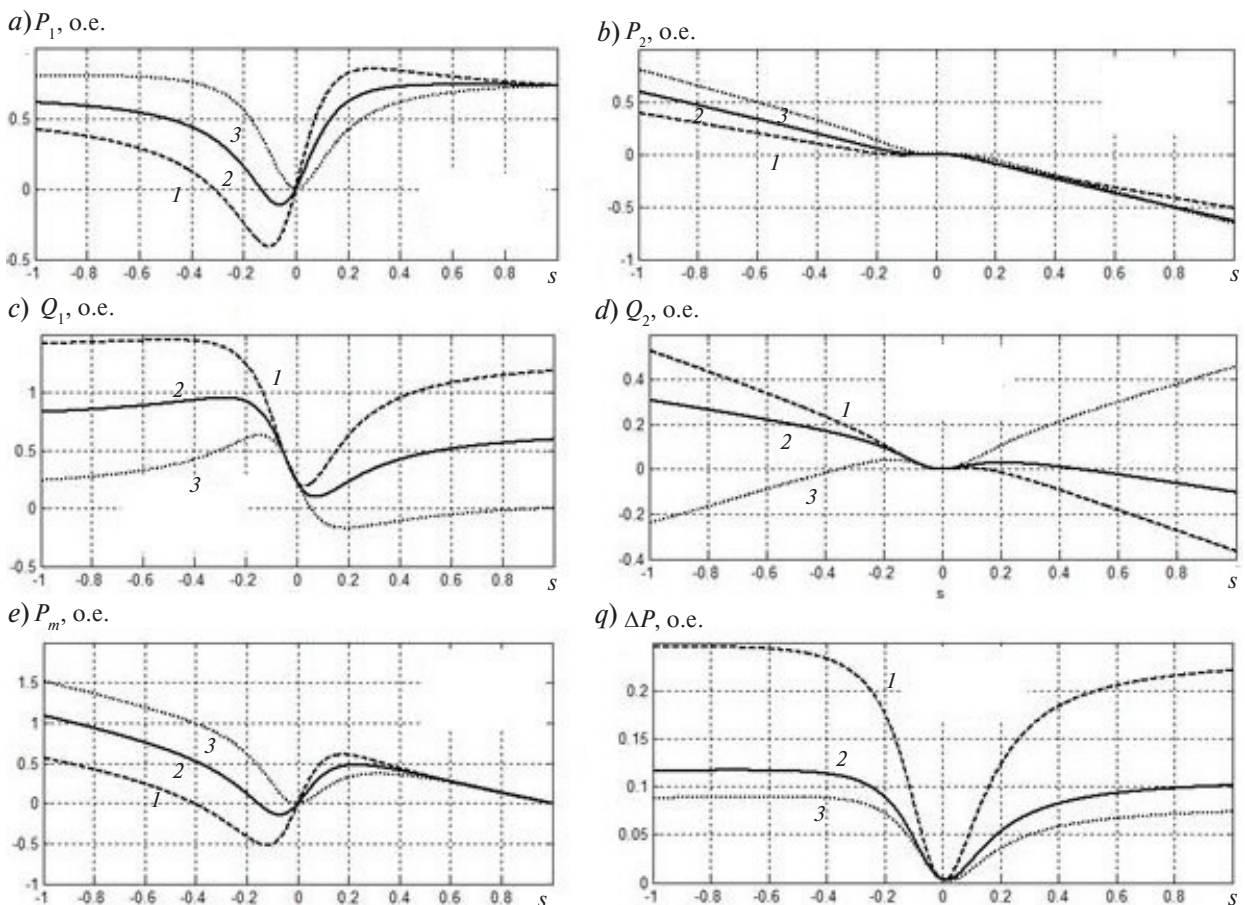


Рис. 1. Статические характеристики МДП при  $\varphi = -\frac{\pi}{10}$  и разных значениях  $n$  (1 – 0,01; 2 – 0,015; 3 – 0,02)

параметра  $n$  статические характеристик МДП аналогичны естественными характеристикам асинхронной машины с короткозамкнутым ротором. Во всем диапазоне изменения скольжения машина двойного питания работает в двигательном режиме.

Таким образом, для обеспечения работы МДП в широком диапазоне изменения скольжения с постоянной активной мощностью необходимо значение параметра  $n$  выбирать таким, чтобы модуль вектора напряжения ротора был сопоставим с модулем вектора напряжения статора.

На рис. 2 представлены статические характеристики МДП, полученные в результате моделирования при  $n = 0,02 = \text{const}$  и значениях угла  $\varphi$ , изменяемых от  $-\frac{\pi}{10}$  до  $\frac{\pi}{10}$  с шагом  $\frac{\pi}{10}$ .

Из графика  $P_1 = f(s)$  рис. 2 следует, что МДП в зависимости от значения угла  $\varphi$  может работать в двигательном или генераторном режиме при скоростях выше и ниже синхронной скорости вращения ротора. При этом с уменьшением зна-

чения угла  $\varphi$  происходит снижение активной мощности (момента). Так, например, при  $\varphi = \frac{\pi}{20}$  максимальное значение активной мощности будет достигать 0,46. Таким образом, при работе МДП с заданным скольжением путем изменения значения угла  $\varphi$  можно плавно изменять величину активной мощности статора, потребляемой или генерируемой в сеть. Работа машины двойного питания в двигательном или генераторном режиме определяется знаком угла  $\varphi$ . При отрицательных значениях угла  $\varphi$  МДП при частотном управлении работает в двигательном режиме, а при положительных значениях – в генераторном.

Из графика  $P_2 = f(s)$  рис. 2 видно, что при скоростях вращения ротора ниже синхронной скорости (положительные значения скольжений) активная мощность ротора возвращается в сеть. При таком режиме работы у МДП с частотным управлением энергопотребление будет ниже, а КПД выше, чем у асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

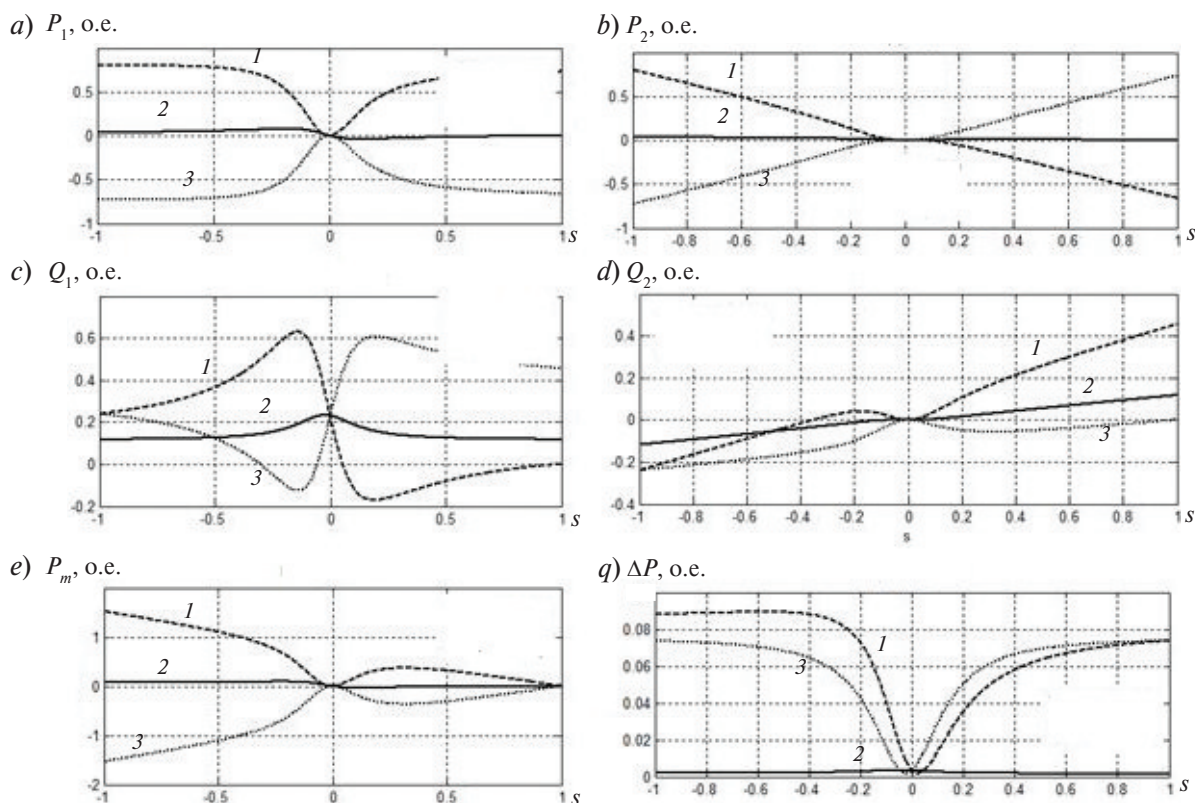


Рис. 2. Статические характеристики МДП при  $n = 0,02$  и разных изменениях  $\varphi$   
 ( $1 - \varphi = -\frac{\pi}{10}$ ;  $2 - \varphi = 0$ ;  $3 - \varphi = \frac{\pi}{10}$ )

При частотах вращения ротора выше синхронной частоты (отрицательные значения скольжения) активная мощность по цепи ротора подводится к машине, обеспечивая ее работу на скоростях выше синхронной скорости. В генераторном режиме работы МДП при скоростях выше синхронной статорные и роторные обмотки машины отдают активную мощность в сеть. При скоростях ниже синхронной скорости активная мощность подводится к ротору машины, компенсируя снижение механической мощности, прикладываемой к валу машины.

При частотах вращения ротора, близких к синхронной частоте, наблюдается снижение до нулевого значения активных мощностей статора и ротора. Этот факт объясняется тем, что согласно выражению (4) с уменьшением скольжения снижается величина модуля вектора напряжения ротора.

#### Работа частотноуправляемой МДП с постоянной активной мощностью статора

Чтобы получить выражение для модуля вектора напряжения ротора, при котором будет обеспечено постоянство активной мощности статора во всем диапазоне скольжений, в первом уравнении системы (4) числитель и знаменатель умножим на комплексно-сопряженное знаменателю выражение. Далее выполним замену векторов соответствующими им комплексными выражениями и произведем разделение мнимых и вещественных частей. В результате преобразований получаются следующие выражения:

$$i_{1xpu} = \left\{ U_{1xpu} \left[ R_{2pu} T_2^2 s^2 + \frac{L_{mpu}^2}{R_{1pu}} s + R_{2pu} \right] - |U_2| L_{mpu} [(T_1 + sT_2) \cos \varphi + (sT_1 T_2 \sigma - 1) \sin \varphi] \right\} / \left\{ R_{1pu} R_{2pu} [(1 - sT_1 T_2 \sigma)^2 + (T_1 + sT_2)^2] \right\}; \quad (6)$$

$$i_{1yпу} = \left\{ -U_{1xпу} T_1 R_{2пу} [1 + T_2^2 \sigma s^2] - |U_2| L_{mpu} [(1 - sT_1 T_2 \sigma) \cos \varphi + (T_1 + sT_2) \sin \varphi] \right\} / \left\{ R_{1пу} R_{2пу} [(1 - sT_1 T_2 \sigma)^2 + (T_1 + sT_2)^2] \right\}.$$

Исходя из системы уравнений (5) значение проекции вектора тока статора на ось  $x$  при за-

данном значении активной мощности статора определяется так:

$$i_{1xпу} = \frac{P_{1пузад}}{1,5U_{1xпу}}, \quad (7)$$

где  $P_{1пузад}$  – заданное значение активной мощности статора.

Из уравнений (6), (7) может быть найдено выражение для амплитуды вектора напряжения ротора:

$$|U_2| = \left\{ U_{1xпу} \left[ R_{2пу} T_2^2 s^2 + \frac{L_{mpu}^2}{R_{1пу}} s + R_{2пу} \right] - \frac{P_{1пузад}}{1,5U_{1xпу}} R_{1пу} R_{2пу} [(1 - sT_1 T_2 \sigma)^2 + (T_1 + sT_2)^2] \right\} / \left\{ L_{mpu} [(T_1 + sT_2) \cos \varphi + (sT_1 T_2 \sigma - 1) \sin \varphi] \right\}. \quad (8)$$

Знаменатель выражения (8) не должен быть равен нулю. Из этого условия получаются ограничения для значений угла  $\varphi$ :

$$\varphi \neq \arctg \frac{(T_1 + sT_2)}{(1 - sT_1 T_2 \sigma)}. \quad (9)$$

Полученные с помощью математической модели статические характеристики машины двойного питания при изменении модуля вектора напряжения ротора согласно выражению (8) приведены на рис. 3.

При моделировании заданное значение активной мощности статора было принято равным 0,5, значение угла  $\varphi$  с учетом ограничений принято равным минус 0,16 рад.

Из статических характеристик машины двойного питания, представленных на рис. 3, видно, что во всем диапазоне изменения скольжения активная мощность статора остается равной заданному значению. Таким образом, можно сделать вывод, что изменение значения модуля вектора напряжения ротора согласно выражению (8) обеспечивает работу МДП с заданной активной мощностью статора во всем диапазоне изменения скольжения. При этом значение угла  $\varphi$  не влияет на величину активной мощности и может быть выбрано, например, из условия обеспечения минимального значения реактивной мощности статора.

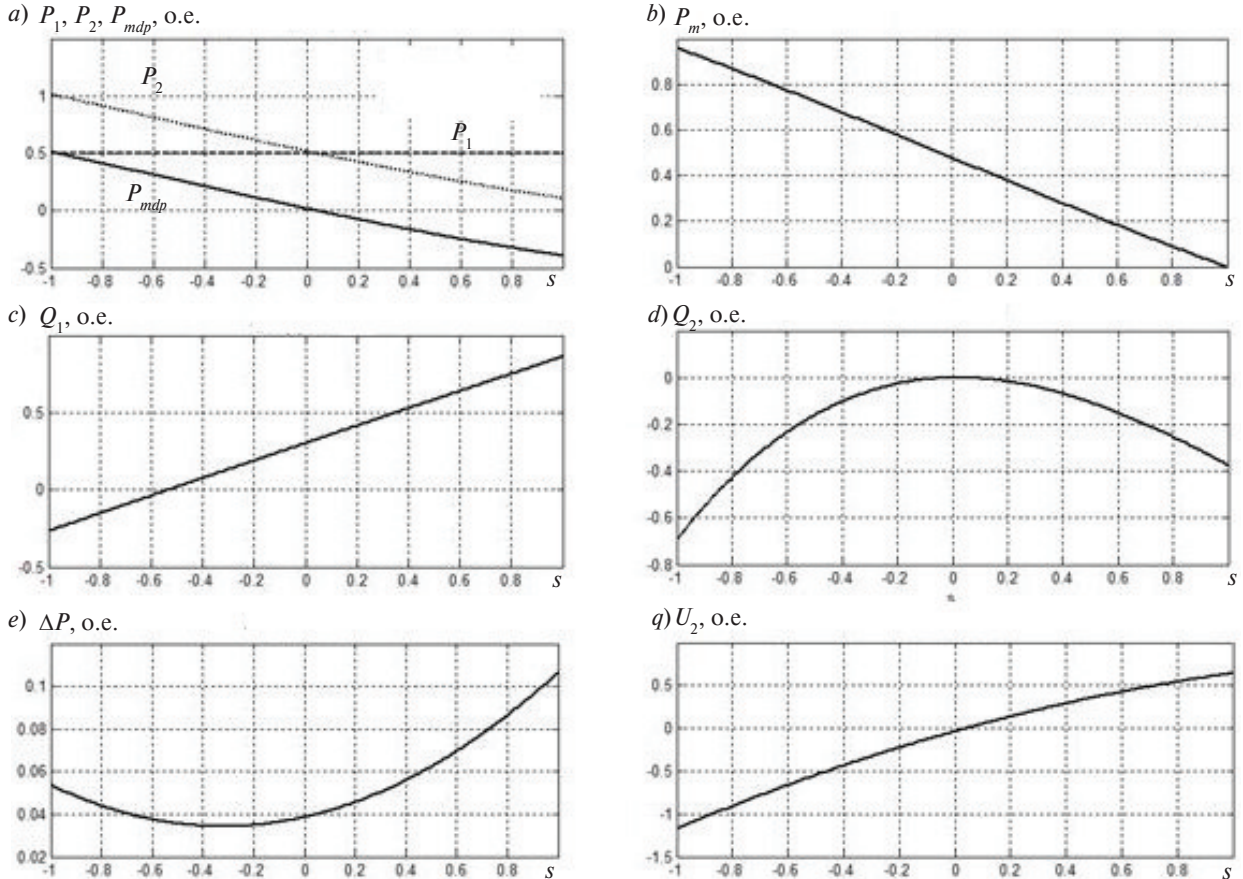


Рис. 3. Статические характеристики МДП при  $P_{1puzad}$  и  $\varphi = 16$

**Работа частотноуправляемой МДП с постоянной реактивной мощностью статора**

Аналогичным образом может быть получено выражение для модуля вектора напряжения ротора, которое соответствует поддержанию значения реактивной мощности статора на заданном уровне. Для этого проекция вектора тока статора на ось  $y$  при заданном значении реактивной мощности статора из системы уравнений (5) выразится следующим образом:

$$i_{1yпу} = -\frac{Q_{1puzad}}{1,5U_{1xпу}}, \quad (10)$$

где  $Q_{1puzad}$  — заданное значение реактивной мощности статора.

На основании уравнений (6), (10) может быть найдено выражение для модуля вектора напряжения ротора:

$$|U_2| = \left\{ -Q_{1puzad} \frac{R_{1пу} R_{2пу}}{1,5U_{1xпу}} [(1 - sT_1T_2\sigma)^2 + (T_1 + sT_2)^2] - U_{1xпу} R_{2пу} T_1 [1 + T_2^2\sigma s^2] \right\} / \left\{ L_{мпу} [(1 - sT_1T_2\sigma) \cos \varphi + (T_1 + sT_2) \sin \varphi] \right\}. \quad (11)$$

Ограничение для значений угла  $\varphi$  получается из условия неравенства нулю знаменателя выражения (11):

$$\varphi \neq -\arctg \frac{(1 - sT_1T_2\sigma)}{(T_1 + sT_2)}. \quad (12)$$

График зависимости (12) для исследуемой машины двойного питания представлен на рис. 4.

Из графика, приведенного на рис. 4, можно сделать вывод о невозможности выполнения условия (12) для любых значений угла  $\varphi$  во всем

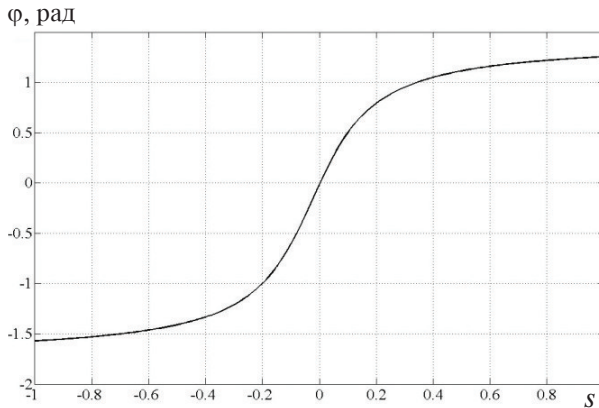


Рис. 4. Значения угла  $\varphi$ , обращающие в нуль знаменатель выражения (11), в зависимости от скольжения  $s$

диапазоне изменения скольжения, так как при любом выбранном значении угла  $\varphi$  знаменатель выражения (11) при соответствующем значении скольжения будет принимать нулевое значение

(пересекать кривую рис. 4). Таким образом, поддержание постоянного значения реактивной мощности статора при изменении модуля вектора напряжения ротора согласно выражению (11) во всем диапазоне изменения скольжения невозможно.

Результаты моделирования работы МДП с постоянным значением реактивной мощности при изменении скольжения в диапазоне от 0,2 до 1,0 и  $\varphi = 0,1$  рад представлены на рис. 5.

Из статических характеристик МДМ, представленных на рис. 5, видно, что в выбранном диапазоне изменения скольжения реактивная мощность остается на заданном значении. Таким образом, можно сделать вывод о правильности полученного выражения (11) для модуля вектора напряжения ротора. Значение угла  $\varphi$  не влияет на поддержание значения реактивной мощности и может выбираться произвольно с учетом ограничения (12).

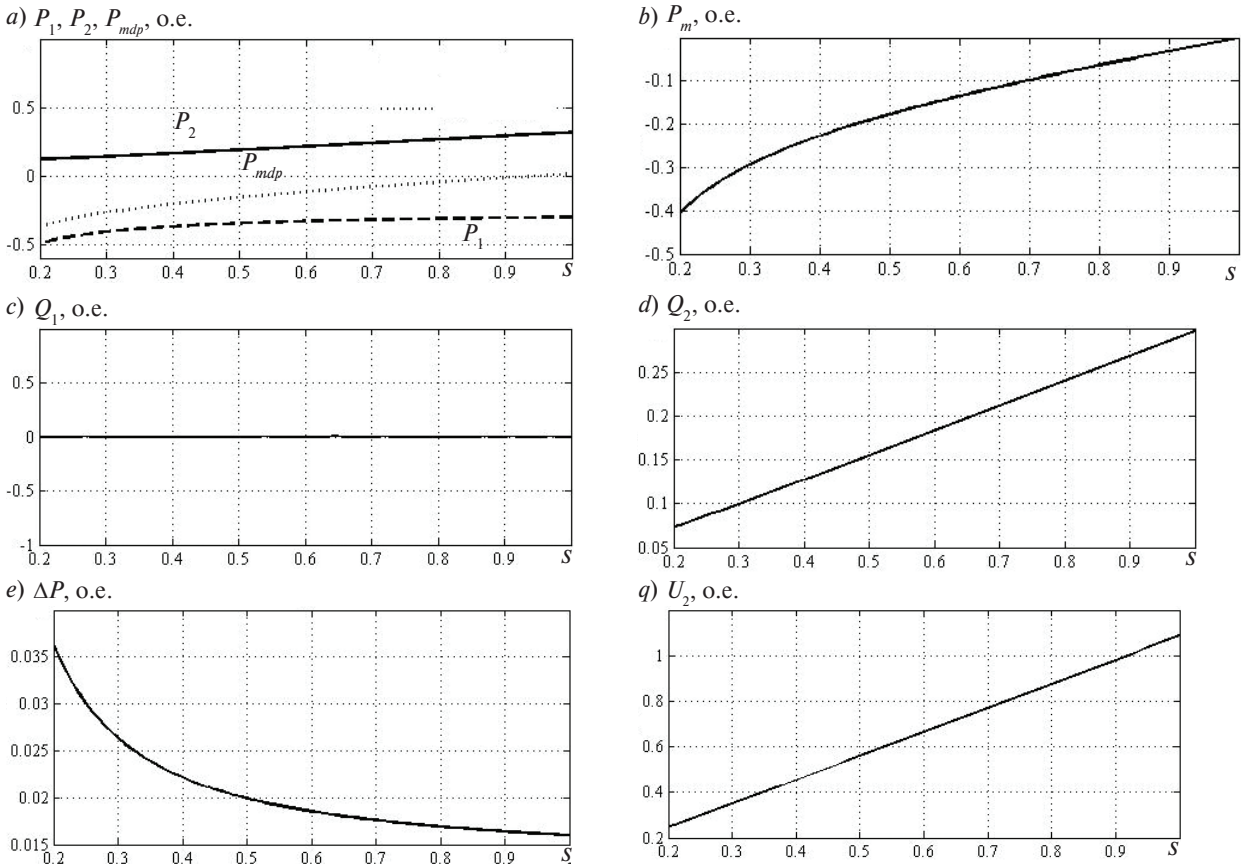


Рис. 5. Статические характеристики МДП при  $Q_{1зад} = 0$ ,  $\varphi = 0,1$  рад

### Заключение

В статье получены уравнения, необходимые для создания математической модели машины двойного питания с частотным управлением. Определены выражения, согласно с которыми должен изменяться модуль вектора напряжения ротора для обеспечения режимов работы частотноуправляемой МДП с постоянной активной мощностью во всем диапазоне изменения скольжения или с постоянным значением реактивной мощности статора в ограниченном диапазоне изменения частоты вращения ротора. Статические характеристики машины двойного питания, полученные с помощью математической модели машины, подтверждают правильность выражений для модуля вектора напряжения ротора и возможность работы МДП с заданными значениями активной или реактивной мощности статора.

На основании результатов математического моделирования можно сделать вывод, что частотное управление машиной двойного питания позволяет получить качественное изменение статических характеристик машины. Такой способ управления МДП может иметь перспективы широкого практического применения в установках на основе таких машин как в двигательных, так и в генераторных режимах работы.

Для подтверждения полученных в данной статье результатов следует в пакете Simulink разработать виртуальную модель частотноуправляемой машины двойного питания и сравнить статические характеристики, полученные на виртуальной и математической моделях МДП.

После окончания модельного исследования свойств машины двойного питания с частотным управлением необходимо создать экспериментальную установку энергоэффективного электропривода на основе такой машины. Для получения высокого КПД электропривода при частотах вращения ротора ниже синхронной частоты полупроводниковый преобразователь, питающий обмотки ротора, должен обеспечивать рекуперацию активной мощности ротора в питающую сеть. На экспериментальной установке следует провести исследования работы электропривода на частотах вращения ротора выше и ниже синхронной частоты в двигательном режиме. При проведении исследований на реальной установке необходимо проверить возможность поддержания постоянной мощности статора (электромагнитного момента) и изменения реактивной мощности (путем изменения угла  $\varphi$ ), а также исследовать статические и динамические свойства электропривода с МДП.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белькинд Л.Д., Конфедератов И.Я., Шнейберг Я.А. История техники. М., Л.: ГЭИ, 1956. 493 с.
2. Веселовский О.Н. М.О. Доливо-Добровольский (1862–1919) : монография. Изд-во АН СССР, 1963. 86 с.
3. Ляпин А.С. Структурная модель, модельное исследование динамики электропривода с машиной двойного питания и прямым управлением моментов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 60–64.
4. Безруких П.П. Ветроэнергетика: Справочное и методическое пособие. М.: ИД «Энергия», 2010. 320 с.
5. Григорьев А.В., Петухов В.А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография. СПб.: Изд-во ГМА имени адмирала С.О. Макарова, 2009. 176 с.
6. Шакарян Ю.Г. Вопросы теории и промышленной эксплуатации асинхронизированных синхронных машин // Труды ВНИИЭ. 1981. Вып. 61. С. 5–8.
7. Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина. М.: Госэнергоиздат, 1960. 38 с.
8. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. М.: Наука, 1969. 140 с.
9. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированная синхронная машина. М.: Энергоатомиздат, 1984. 192 с.
10. Хватов О.С. Управляемые генераторные комплексы на основе машины двойного питания: монография / Нижегород. гос. техн. ун-т. Н-Новгород, 2000. 204 с.
11. Блоцкий Н.Н. [и др.] Вопросы теории и промышленной эксплуатации асинхронизированных синхронных машин. М.: Энергоатомиздат, 1981. 107 с.
12. Лабунец И.А. [и др.] Режимы работы, статические и динамические характеристики асинхронизированных турбогенераторов. Киев. 1987. 45 с.
13. Захри М.И. [и др.] Промышленные испытания асинхронизированного генератора мощностью 50 МВА // Электричество. 1973. № 4. С. 52–54.
14. Никитин П.З. [и др.] Асинхронизированный синхронный электропривод цементной мельницы // Электричество. 1978. № 3. С. 81–82.
15. Abad G., Lopez J., Rodriguez M.A., Iwanski G. Double fed induction machine. Modeling and control for wind energy generation. 2011. 633 p.



16. **Ляпин А.С.** Получение и анализ статических характеристик машины двойного питания при питании роторных обмоток от источника напряжения

// Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 1. С. 30–34.

## REFERENCES

1. **Belkind L.D., Konfederatov I.Ya., Shneyberg Ya.A.** Istoriya tekhniki. Moscow, Leningrad: GEI, 1956. 493 s. (rus)
2. **Veselovskiy O.N.** M.O. Dolivo-Dobrovolskiy (1862–1919). Izd-vo AN SSSR, 1963. 86 s. (rus)
3. **Lyapin A.S.** Strukturnaya model, modelnoye issledovaniye dinamiki elektroprivoda s mashinoy dvoynogo pitaniya i pryamym upravleniyem momentov. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2012. № (80). S. 60–64. (rus.)
4. **Bezrukikh P.P.** Vetroenergetika. Spravochnoye i metodicheskoye posobiye. M.: Energiya, 2010. 320 s. (rus)
5. **Grigoryev A.V., Petukhov V.A.** Sovremennyye i perspektivnyye sudovyye valogeneratornyye ustanovki: monografiya. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova, 2009. 176 s. (rus)
6. **Shakaryan Yu.G.** Voprosy teorii i promyshlennoy ekspluatatsii asinkhronizirovannykh sinkhronnykh mashin. *Trudy VNIIE*. 1981. № 61. S. 5–8. (rus)
7. **Botvinnik M.M.** Asinkhronizirovannaya sinkhronnaya mashina. Moscow: Gosenergoizdat, 1960. 38 s. (rus)
8. **Botvinnik M.M., Shakaryan Yu.G.** Upravlyayemaya mashina peremennogo toka. Moscow: Nauka, 1969. 140 s. (rus)
9. **Shakaryan Yu.G.** Asinkhronizirovannaya sinkhronnaya mashina. Moscow: Energoatomizdat., 1984. 192 s. (rus)
10. **Khvatov O.S.** Upravlyayemyye generatornyye komplekсы na osnove mashiny dvoynogo pitaniya / [Controlled generating systems based on the double fed machine]: monografiya / Nizhegorod. gos. tekhn. un-t. N-Novgorod, 2000. 204 s. (rus)
11. **Blotskiy N.N. [i dr.]** Voprosy teorii i promyshlennoy ekspluatatsii asinkhronizirovannykh sinkhronnykh mashin. Moscow: Energoatomizdat. 1981. 107 s. (rus)
12. **Labunets I.A. [i dr.]** Rezhimy raboty, staticheskiye i dinamicheskiye kharakteristiki asinkhronizirovannykh turbogeneratorov. Kiev, 1987. 45 s. (rus)
13. **Zakhri M.I. [i dr.]** Promyshlennyye ispytaniya asinkhronizirovannogo generatora moshchnostyu 50 MVA. *Elektrichestvo*. 1973. № 4. S. 52–54. (rus)
14. **Nikitin P.Z. [i dr.]** Asinkhronizirovannyi sinkhronnyy elektroprivod tsementnoy melnitsy. *Elektrichestvo*. 1978. № 3. S. 81–82. (rus)
15. **Abad G., Lopez J., Rodriguez M. A., Iwanski G.** Double fed induction machine. Modeling and control for wind energy generation. 2011. 633p.
16. **Lyapin A.S.** Polucheniye i analiz staticheskikh kharakteristik mashiny dvoynogo pitaniya pri pitanii rotornykh obmotok ot istochnika napryazheniya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. 2014. № 1. S. 30–34. (rus)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ЛЯПИН Анатолий Сергеевич** – аспирант Балтийского государственного технического университета «Военмех» имени Д.Ф. Устинова.  
190005, Санкт-Петербург, 1-ая Красноармейская ул., д.1.  
E-mail: ACLyapin@yandex.ru

**LYAPIN Anatolii S.** – Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov.  
1 1st Krasnoarmeyskaya St., St.Petersburg, 190005, Russia.  
E-mail: ACLyapin@yandex.ru