

УДК 621.313.333.2

**Г.Н. Давлетбаева, М.Е. Тюленев**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ С РАЗЛИЧНЫМ ХАРАКТЕРОМ МОМЕНТА  
СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Объектом данного исследования является асинхронный двигатель средней мощности с короткозамкнутым ротором. Проведено исследование влияния провалов напряжения сети на работу асинхронного двигателя с различным характером момента сопротивления. Изучено, как меняется частота вращения двигателя при различном значении времени и величины провалов напряжения сети. Эксперименты проводились на математической модели асинхронного двигателя, составленной в среде моделирования Simulink, программного обеспечения MatLab. Представлены соответствующие выводы.

**Ключевые слова:** провалы напряжения, самозапуск, опрокидывание.

**G.N. Davletbaeva, M.E. Tyulenev**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**STUDYING STABILITY FOR INDUCTION MOTOR  
WITH VARIOUS TYPE OF TORQUE RESISTANCE**

The induction motor with squirrel-cage rotor was studied. The effect of voltage falling studied with various type of torque resistance. The experiments were performed on a mathematical model of the induction motor in the programming environment Simulink. Changing rotation speed was calculated for different values of time and depth falling voltage. There are presented conclusions.

**Keywords:** voltage falling, self-starting, stalling of motor.

Провалы напряжения являются важным показателем качества электроэнергии в промышленности. Согласно ГОСТ 13109-97 провал напряжения – это внезапное снижение напряжения сети ниже  $0,9 U_{ном}$ , за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от 10 мс до нескольких десятков секунд [1]. Причинами провалов напряжения являются: изменение нагрузок, работа устройств автоматического повторного включения, короткие замыкания, запуски мощных электродвига-

телей в той же распределительной сети, неисправности на смежных участках [2].

С точки зрения обеспечения устойчивости технологических процессов важно оценить влияние провалов напряжения на работу асинхронных двигателей, так как на их долю приходится не менее 80 % всех электродвигателей, выпускаемых в промышленности. По характеру момента сопротивления двигателя делятся на двигатели с постоянным моментом сопротивления (шаровые мельницы, конвейеры, прокатные станы и т.д.) и двигатели, обладающие вентиляторными характеристиками момента сопротивления (центробежные насосы, вентиляторы, центрифуги и т.д.) [3]. Для двигателей, работающих с полной нагрузкой, понижение напряжения приводит к уменьшению частоты вращения. Если производительность механизмов зависит от частоты вращения, то на выводах таких двигателей рекомендуется поддерживать напряжение не ниже номинального. При значительном снижении напряжения на выводах двигателей, работающих с полной нагрузкой, момент сопротивления механизма может превысить вращающий момент, что приведет к «опрокидыванию» двигателя, т.е. к его остановке [4].

Исследование рационально проводить с использованием математической модели в неподвижной системе координат  $\alpha$ - $\beta$ . Оси  $\alpha$ - $\beta$  неподвижны в пространстве, причем ось  $\alpha$  совмещена с осью фазы «а» статора. В общем случае состояние электрической машины описывается системой пяти дифференциальных уравнений (1), связывающих между собой электромагнитные и механические величины [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}, \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}, \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = -\omega \cdot \psi_{r\beta} - R_r \cdot i_{r\alpha}, \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = \omega \cdot \psi_{r\alpha} - R_r \cdot i_{r\beta}, \\ \frac{d\omega}{dt} = (m - m_c) / J, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $U_{s\alpha}$ ,  $U_{s\beta}$  – напряжения на обмотке статора;  $i_{s\beta}$ ,  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{r\beta}$ ,  $i_{r\alpha}$  – токи, протекающие по обмоткам машины;  $R_s$ ,  $R_r$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора;  $J$  – момент инерции привода, приведенный к валу ротора;  $m$ ,  $m_c$  – момент электромагнитный и момент сопротивления;  $\omega \cdot \psi_{r\beta}$ ,  $\omega \cdot \psi_{r\alpha}$  – ЭДС вращения.

Потокосцепления электрических контуров АД определяются намагничивающим действием токов этих контуров:

$$\begin{cases} \Psi_{s\alpha} = L_s \cdot i_{s\alpha} + L_m \cdot i_{r\alpha}, \\ \Psi_{s\beta} = L_s \cdot i_{s\beta} + L_m \cdot i_{r\beta}, \\ \Psi_{r\alpha} = L_r \cdot i_{r\alpha} + L_m \cdot i_{s\alpha}, \\ \Psi_{r\beta} = L_r \cdot i_{r\beta} + L_m \cdot i_{s\beta}, \\ m = \Psi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}. \end{cases} \quad (2)$$

где  $L_m$  – коэффициент взаимной индукции;  $L_r$ ,  $L_s$  – индуктивности самоиндукции статора и ротора

Все исследования были проведены в среде имитационного моделирования Simulink интерактивной среды программирования MatLab. Выбранная среда Simulink позволяет при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы [6]. Модель исследуемого асинхронного двигателя (АД) изображена на рис. 1.

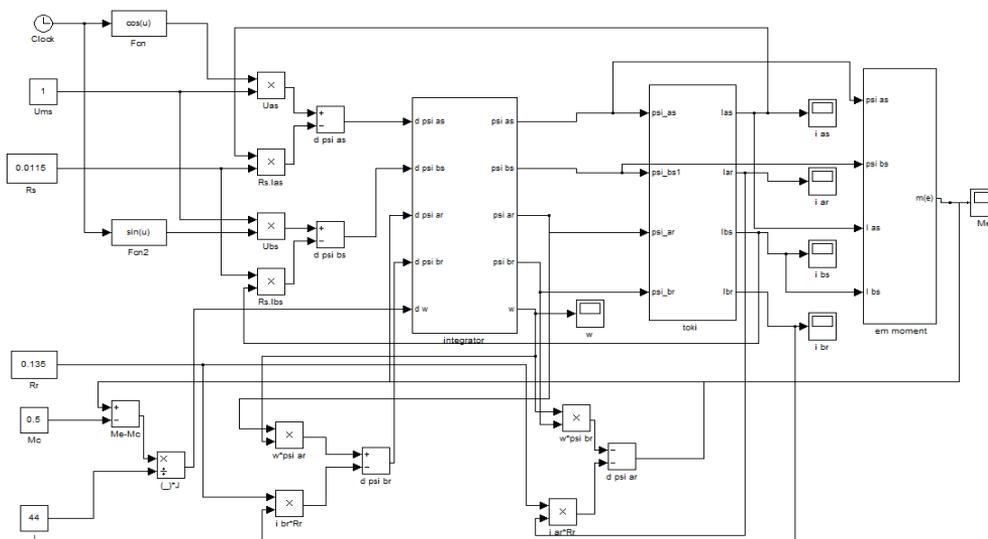
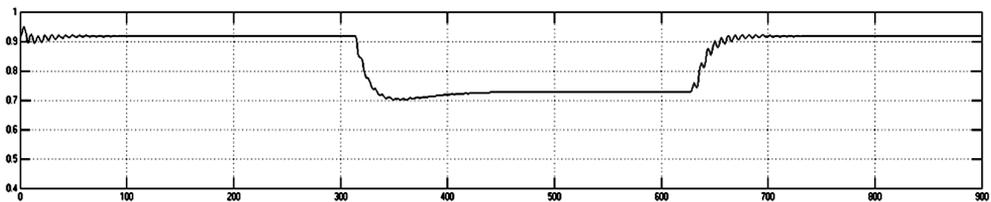


Рис. 1. Структурная схема АД в среде визуального программирования Simulink

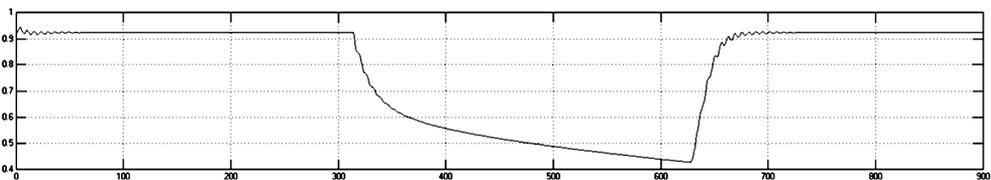
В этой схеме блок *integrator* осуществляет интегрирование переменных состояния (потокосцепления и частоты вращения) в соответствии с уравнениями (1), блок *toki* реализует решение системы уравнений (2), блок *em moment* рассчитывает значение электромагнитного момента.

Ниже представлены результаты, полученные в ходе исследования:

1) При снижении напряжения питания на 50 % в течение 1 с у двигателя с вентиляторным моментом сопротивления частота вращения снижается на 28 % в течение 0,64 с и сохраняется постоянной на протяжении времени посадки напряжения (рис. 2, *а*), а восстанавливается в течение 0,38 с. Время на графиках приведено в относительных единицах. Переход к абсолютному времени осуществляется в соответствии с соотношением  $t(c) = t(\text{рад})/314$ .



*а*



*б*

Рис. 2. Временные диаграммы изменения частоты вращения АД с вентиляторным (*а*) и постоянным (*б*) моментом сопротивления при снижении напряжения сети на 50 % в течение 1 с

Электромагнитный момент сохраняет постоянство за исключением временного интервала электромагнитных переходных процессов (рис. 3, *а*). У двигателя с постоянным моментом сопротивления скорость снижается на 58 % (рис. 2, *б*) в течение всего времени посадки напряжения, а восстанавливается в течение 0,38 с.

Электромагнитный момент при этом остается постоянным, исключая участки переходного процесса (рис. 3, *б*).

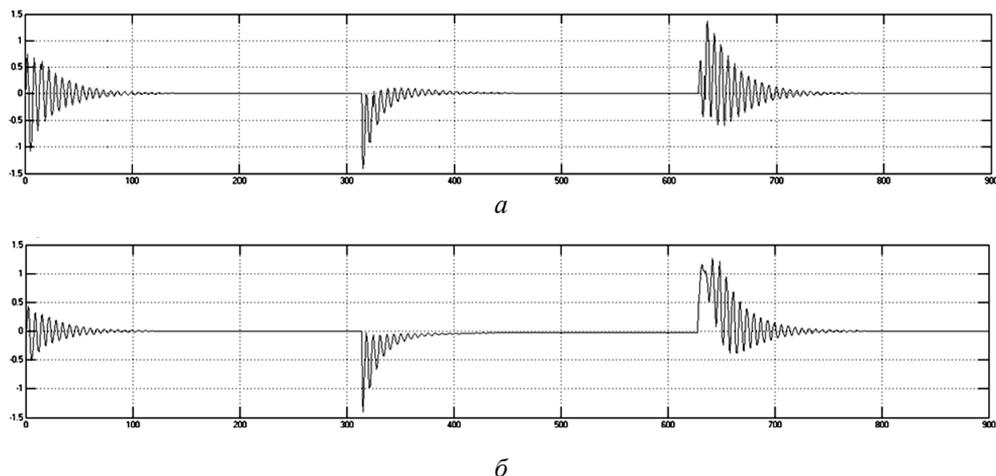


Рис. 3. Временные диаграммы изменения динамического момента АД с вентиляторным (а) и постоянным (б) моментом сопротивления при снижении напряжения сети на 50 % в течение 1 с

2) При снижении напряжения питания на 50 % в течение 3,2 с у двигателя с вентиляторным моментом сопротивления скорость снижается на 28 % и остается постоянной в течение всего времени посадки напряжения, а восстанавливается в течение 0,38 с (рис. 4, а).

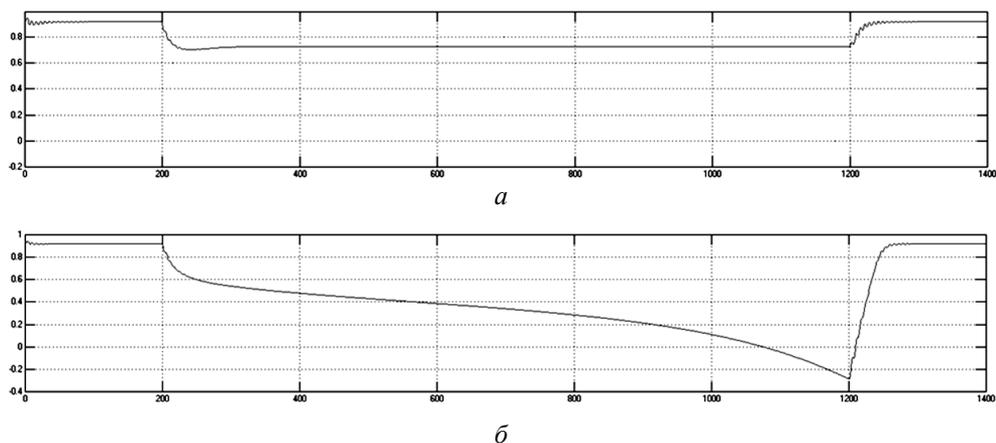
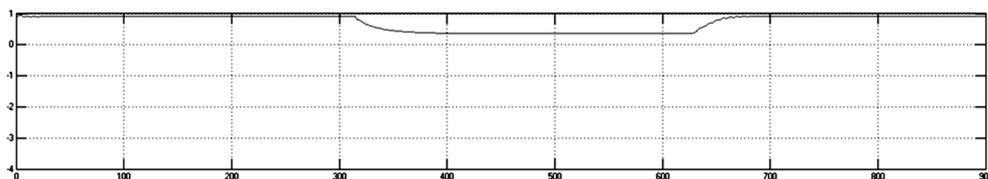


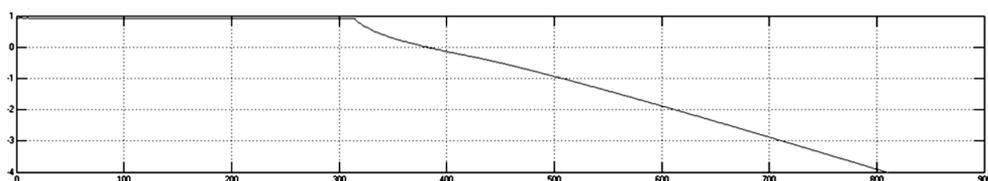
Рис. 4. Временные диаграммы скорости АД с вентиляторным (а) и постоянным (б) моментом сопротивления при снижении напряжения сети в течение 3,2 с

Динамический момент при этом остается постоянным, исключая участки с электромагнитными переходными процессами. АД с постоянным моментом сопротивления опрокидывается за 2,8 с (рис. 4, б). электромагнитный момент при этом теряет постоянство.

3) При снижении напряжения питания на 70 % в течение 1 с у АД с вентиляторным моментом сопротивления происходит снижение скорости на 62 % в течение всего времени посадки напряжения, а восстанавливается в течение 0,38 с (рис. 5, а).



а



б

Рис. 5. Временные диаграммы скорости АД с вентиляторным (а) и статическим (б) моментом сопротивления при снижении напряжения на 70 % в течение 1 с

АД с постоянным моментом сопротивления опрокидывается за 0,16 с (рис. 5, б) электромагнитный момент при этом не сохраняет постоянства.

4) При снижении питающего напряжения на 80 % на 1 с АД с вентиляторным моментом опрокидывается спустя 0,61 с и самозапускается при восстановлении напряжения. АД с постоянным моментом опрокидывается в течение 0,12 с.

Все результаты обобщены в таблице.

Сводная таблица

Величина снижения $U_c$	Время, с	АД с вентиляторным моментом сопротивления			АД с постоянным моментом сопротивления		
		Снижение скорости	Опрокидывание	Успешность самозапуска	Снижение скорости	Опрокидывание	Успешность самозапуска
50 %	1	28 %	–	+	58 %	–	+
50 %	3,2	28 %	–	+	100 %	за 2,8 с	–
70 %	1	62 %	–	+	100 %	за 0,16 с	–
80 %	1	100%	за 0,61 с	+	100%	за 0,12 с	–

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Асинхронный двигатель, имеющий вентиляторный момент сопротивления, менее чувствителен к посадкам напряжения в сети. Он может выдерживать посадку напряжения в течение длительного времени, при восстановлении питающего напряжения успешно самозапускается, так как его момент сопротивления уменьшается с понижением частоты вращения.

2. АД с постоянным моментом сопротивления при кратковременном снижении напряжения быстрее теряет частоту вращения и медленнее разгоняется, для самозапуска такого двигателя необходимо, чтобы за время снижения напряжения частота вращения не успела достигнуть нуля.

3. В ходе исследования было выявлено, что при восстановлении напряжения в АД происходят броски тока. При восстановлении напряжения у АД с постоянным моментом сопротивления самозапуск происходит в течение длительного периода, что может привести к перегреву машины.

4. Во избежание аварийных ситуаций нужно использовать самозапуск машины только на ответственных потребителях. Во всех остальных случаях необходимо использовать защитную аппаратуру, которая будет производить полное отключение машины от сети и появится возможность произвести запуск посредством специальных условий пуска.

### **Библиографический список**

1. Ершов С.В., Михайлов А.М. Анализ влияния провалов напряжения на показатели работы систем электроснабжения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 12. – Ч. 2. – С. 62–63.

2. Шпиганович А.Н. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2006. – С. 21–22.

3. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). – М.: Высшая школа, 1987.

4. Суднова В.В. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников // ЗАО «Энергосервис». – М., 2000. – 80 с.

5. Чэпмэн Д. Прикладное руководство по качеству электроэнергии / пер. с англ. Е.В. Мельниковой // Энергосбережение. – 2004. – Вып. 1. – С. 66–69.

6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – СПб.: Питер, 2007. – С 3–4.

## References

1. Ershov S.V., Michailov A.M. Analiz vliianiia provalov napriazheniia na pokazateli raboty sistem elektrosnabzheniia [Application of diagnostic complexes of power supply systems to improve their performance] *Izvestiia Tul'skii gosudarstvennyi universitet. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no 12, pp 62-63.
2. Shpiganovich A.N. Provaly napriazheniia v vysokovol'tnykh elektricheskikh setiakh [Dips in high-voltage electrical networks] *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ia*, 2006, no. 2, pp 21-22.
3. Sipailov G.A., Kononenko E.V., Khor'kov K.A. Elektricheskie mashiny (spetsial'nyi kurs) [Electrical machinery (special course)]. Moscow: Vysshaia shkola, 1987, p. 14.
4. Sudnova V.V. Vliianie kachestva elektroenergii na rabotu elektropriemnikov [Impact on power quality work electroreceivers]. Moscow: *Energoservis*, 2000. 80 p.
5. Chepmen D. Prikladnoe rukovodstvo po kachestvu elektroenergii, [Quality manual power management]. *Energoberezhenie*, 2004, no 1, pp. 66-69.
6. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink [Modeling of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink] Saint Petersburg: Piter, 2007, pp. 3-4.

## Сведения об авторах

**Далетбаева Галия Назифовна** (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: galchonocheck-@mail.ru).

**Тюленев Михаил Евгеньевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nipo@pstu.ru).

## About the authors

**Davletbaeva Galiya Nazifovna** (Perm, Russian Federation) – is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: galchonocheck-@mail.ru).

**Tyulenyov Michail Yevgenyevich** (Perm, Russian Federation) – is Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: nipo@pstu.ru).

Получено 10.06.2014