

УДК 621.313

**Н.В. Жужгов, С.В. Шутемов**  
Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ И ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ**

В статье исследован синхронный пуск синхронного двигателя (СД) при заданной частоте и напряжении источника питания, при которых двигатель способен запуститься без асинхронного режима. Представлены результаты влияния угла положения ротора на угол нагрузки. Определен диапазон частот, при которых возможен синхронный пуск СД.

**Ключевые слова:** синхронный пуск; синхронный двигатель; угловое положение ротора, угол нагрузки.

**N.V. Zhuzhgov, S. V. Shutemov**  
Perm national research polytechnic university

## **RESEARCH OF SYNCHRONOUS START OF A SYNCHRONOUS MOTOR WHEN CHANGING THE PARAMETERS OF THE ENGINE AND POWER SUPPLY**

The article investigates the synchronous start of a synchronous motor at a given frequency and voltage of the power supply, at which the motor is able to start without an asynchronous mode. The results of the influence of the angle of the rotor position on the load angle are presented. The frequency range for which a synchronous start of a synchronous motor is possible has been determined.

**Keywords:** synchronous start; synchronous motor; angular position of the rotor; rotor angular position.

В настоящее время все большее внимание уделяется СД, преимущества которых по сравнению с асинхронными двигателями безусловны. Все большее внимание привлекает вопрос использования СД с постоянными магнитами, который позволяет сократить потери, нежели СД традиционного исполнения.

Известно, что наиболее ответственным режимом является пуск СД, который традиционно проходит в асинхронном режиме.

Пуск СД с постоянными магнитами невозможно осуществить традиционным методом, то есть асинхронным, так как в нем отсутствует обмотка возбуждения.

С развитием электроники и микропроцессорной техники все чаще появляются другие способы пуска СД отличные от традиционных. Одним из таких способов является частотный пуск, который требует использования преобразователя частоты. В процессе пуска частота изменяется, как правило, от



с  $0,5M_n$  до номинального  $M_n=64Нм$  через время  $0,25с$ . В ходе исследования выбиралось значение углового положения равное  $th(deg)$  таким, при котором переходные процессы в процессе синхронного пуска проходят наиболее плавно. Полученные результаты сравнивались с результатами [1], которые получены при  $th(deg)=-90^\circ$ .

В ходе исследования было промоделировано несколько вариантов синхронного пуска СД в диапазоне значений  $th(deg)$  от  $-90^\circ$  до  $-40^\circ$ . На рис. 2 представлены результаты исследования крайнего значения параметра  $th(deg)=-40^\circ$ , сравним их с результатами [1] при  $th(deg)=-90^\circ$ .

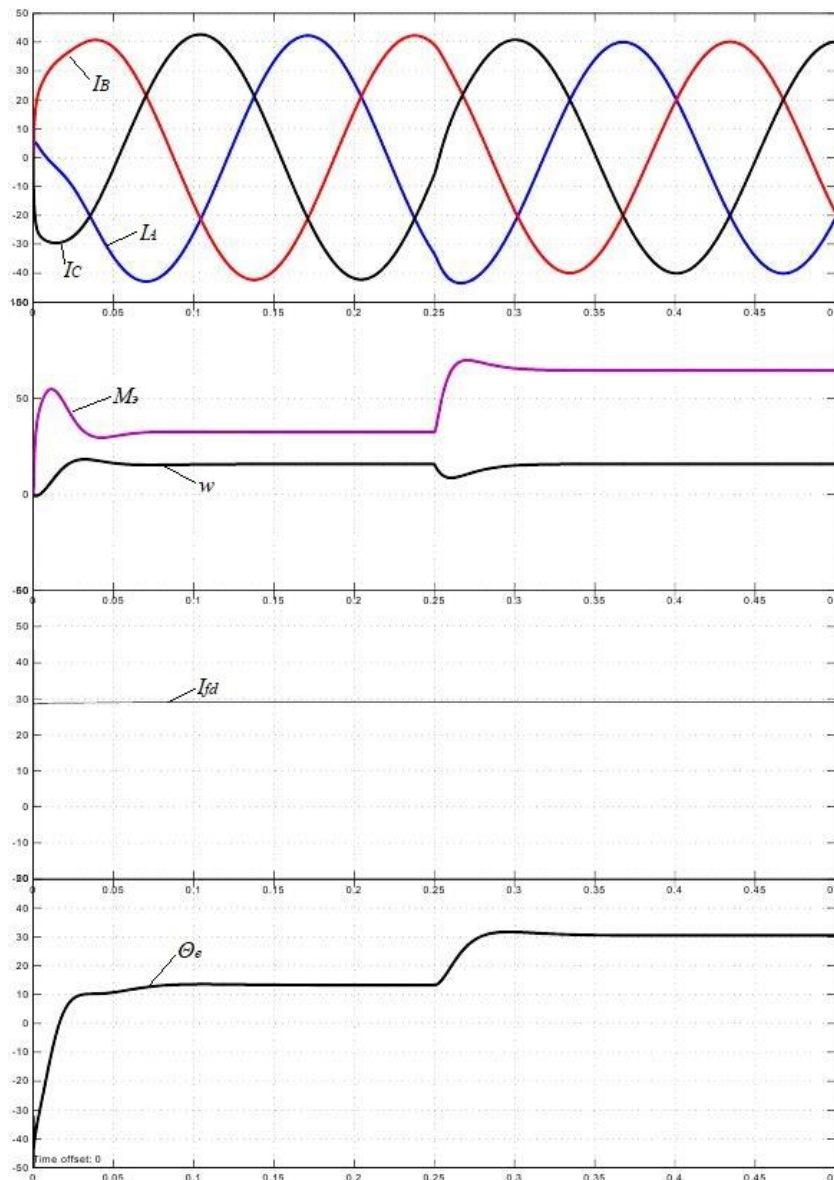


Рисунок 2 – Результаты синхронного пуск СД при  $th(deg)=-40^\circ$

В ходе сравнения результатов исследования следует отметить, что при увеличении угла  $th(deg)$  до  $-40^\circ$ , синхронный пуск сопровождается плавным нарастанием скорости вращения ротора. Практически мгновенно, наступает процесс синхронизации, и через время  $t=0,08с$  ротор начинает вращаться с синхронной скоростью. Ударный электромагнитный момент достигает значения  $M_{э,уд}=54,6Нм$ , что на  $10Нм$  меньше, чем при синхронном пуске СД

при  $th(deg)=-90^\circ$ . Ток статора в момент пуска не превышает номинального значения, а в установившемся режиме равен  $I_{m_s}=42,2A$ . Физический угол нагрузки  $\Theta_e$  плавно достигает значения  $13,2^\circ$ . После наброса номинальной нагрузки, ротор СД практически мгновенно синхронизируется, электромагнитным момент плавно достигает номинального значения, а физический угол нагрузки  $\Theta_e$  увеличивается с  $13,4^\circ$  до  $35,5^\circ$ .

При значениях угла  $th(deg)$  больше  $-40^\circ$  и меньше  $-90^\circ$ , синхронный пуск не сопровождается плавным нарастанием скорости вращения ротора.

Исходя из результатов анализа, следует, чтобы выбрать значение начального положения ротора  $th(deg)$  в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $-40^\circ$ , обратимся к теории автоматического управления (ТАУ).

В ТАУ существуют показатели качества переходных процессов. Одной из оценок качества является оценка качества переходной характеристики системы автоматического регулирования относительно задающего воздействия [3]. Под этим подразумевается, что чем лучше переходная характеристика, тем лучше система будет обрабатывать произвольное задающее воздействие. К основным показателям качества переходной характеристики относят перерегулирование  $\sigma$  и время регулирования  $t_p$ .

Основываясь на ТАУ, проведен расчет перерегулирования и времени регулирования полученных результатов скорости вращения при начальном положении ротора  $th(deg)$  равном  $-40^\circ$  и  $-90^\circ$  при аналогичных условиях задания момента сопротивления.

При  $th(deg)=-90^\circ$  перерегулирование составляет  $\sigma=102\%$ , а время регулирования  $t_p=0,22c$ . При  $th(deg)=-40^\circ$  перерегулирование составляет  $\sigma\approx 16\%$ , а время регулирования  $t_p=0,1c$ . Следовательно, для выбора начального положения ротора  $th(deg)$  следует обращать внимание на требования, предъявляемые к механизмам электропривода, в которых применяется СД.

**Влияние на синхронный пуск СД при изменении параметров источника питания.** Исследуем синхронный пуск СД при различных значениях напряжения и частоты источника питания. В ходе исследования было промоделировано несколько вариантов синхронного пуска в диапазоне частот от  $5Гц$  до  $25Гц$ . При этом соблюдалось условие, что при номинальном моменте сопротивления статорный ток должен соответствовать номинальному значению равному  $I_s=30A$ . Момент сопротивления на валу двигателя аналогичен закону изменения предыдущих исследований.

Как следует из теории [4,5], с увеличением частоты источника питания, но сохранения тока, необходимо увеличить напряжение, подводимое к статорной обмотке. В исследуемом диапазоне частот подводимое напряжение менялось в пределах от  $110В$  до  $270В$ .

На рис. 4 представлен график связывающий напряжение и частоту, при которых обеспечивается синхронный пуск СД с заданным моментом сопротивления.

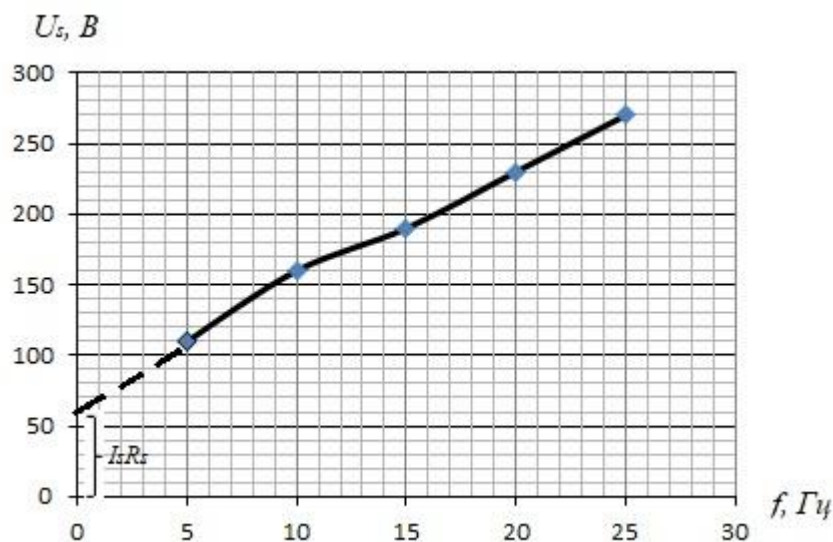


Рисунок 4 – Синхронный пуск синхронного двигателя при изменении напряжения и частоты

Исходя из результатов, представленных на рис. 4, следует, что синхронный пуск исследуемого СД можно осуществить до частоты порядка  $25\text{Гц}$  при половинном моменте сопротивления в процессе пуска.

#### Выводы:

1. Выбор начального положения ротора  $th(deg)$  при синхронном пуске в основном зависит от предъявляемых требований в техническом задании.
2. Синхронный пуск СД можно осуществить до частоты порядка  $25\text{Гц}$ , но при этом необходимо увеличивать напряжение не пропорционально частоте.

#### Список литературы

1. Влияние частоты питающей сети на угол нагрузки синхронного двигателя / Н.В. Жужгов, Н.Н. Вилисов, А. Т. Ключников // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 30-31 мая 2019 г.): в 2 т. Т. 1. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. - С. 40-45.
2. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса / А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы I Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 24–25 сентября 2015 г.). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 158–162.
3. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
4. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студентов высш. учеб. заведения. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

5. Влияние активного сопротивления в частотно-управляемом ЦЛВД / Д. А. Чирков, А. Т. Ключников, А. Д. Коротаев, Э. О. Тимашев // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 17 мая 2018 г.): в 2 т. Т. 2. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2018. - С. 133-138.

#### **Сведения об авторах**

**Жужгов Никита Васильевич** – Аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. ЭТЭ-19-а, г. Пермь, e-mail: heinekt95@gmail.com.

**Шутемов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, e-mail: shutemsv@yandex.ru.

#### **About the authors**

**Zhuzhgov Nikita Vasilievich** – Post-graduate student of the Perm National Research Polytechnic University, gr. ETE-19-a, Perm, e-mail: heinekt95@gmail.com.

**Shutemov Sergey Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: shutemsv@yandex.ru.