УДК 313.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВОЗДУШНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА НА БАЗЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И АНАЛИЗ ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГОСИСТЕМУ ПРЕДПРИЯТИЯ

MODELING OF THE START-UP MODES OF AN ELECTRIC DRIVE OF AN AIR CENTRIFUGAL COMPRESSOR BASED ON A HIGH-VOLTAGE SYNCHRONOUS MOTOR AND ANALYSIS OF ITS IMPACT ON THE POWER SYSTEM OF THE ENTERPRISE

Шишлин Денис Иванович
кандидат технических наук,
доцент,
доцент кафедры автоматизированного электропривода и робототехники,
Липецкий государственный технический университет

Голощапов Александр Анатольевич
ведущий инженер лаборатории релейной защиты
ЦЭлС ПАО «НЛМК»
denis-shishlin@yandex.ru

Аннотация. В данной работе произведено исследование действующей системы электропривода компрессора, а также рассмотрены возможные варианты ее модернизации, направленные на улучшение качества электроснабжения потребителей и энергетических показателей технологической установки.

Ключевые слова: синхронный электропривод, пусковые токи, математическая модель, реакторный пуск, безударный пуск, частотный пуск.

Shishlin Denis Ivanovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Automated Electric Drive and Robotics,
Lipetsk State Technical University

Goloshchapov Alexander Anatolyevich
Lead Engineer
of the Relay Protection Laboratory
of the Central Energy Laboratory
of PAO «NLMK»
denis-shishlin@yandex.ru

Annotation. At present, the development and study of methods for limiting starting currents is an urgent task for objects used at industrial enterprises of various profiles. In this paper, a study of the current compressor electric drive system was conducted, and possible options for its modernization aimed at improving the quality of power supply to consumers and the energy indicators of the process plant were considered.

Keywords: synchronous electric drive, starting currents, mathematical model, reactor start-up, shock-free start-up, frequency start-up.

Современное производство включает в себя множество взаимосвязанных, сложных технологических процессов, обеспечение протекания которых зависит от надежной и стабильной работы энергосистемы. Процесс эксплуатации электрооборудования и машин отдельных технологических агрегатов, должен полностью исключать или минимизировать влияние на общую систему электроснабжения.

Одним из энергоемких элементов любого производства, в частности металлургии и нефтегазовой отрасли [1], являются высоковольтные синхронные двигатели электроприводов мощных насосов, компрессоров и вентиляторов. Запуск такого типа машин обычно сопровождается высокими пусковыми токами, что в свою очередь, приводит к просадкам питающего напряжения. Возникающие при этом переходные процессы могут негативно сказываться как на работе энергосистемы в целом, так и на работе электромеханических и иных систем [2, 3, 4].

В данной статье проводится исследование систем электроснабжения и управления синхронного электропривода воздушного компрессора с использованием программ Matlab Simulink, а также поиск оптимального решения по ограничению нагрузок на систему электроснабжения и электромеханический комплекс в целом.

Компрессор К-1500-62-1 – это агрегат центробежного типа одноцилиндровый, шести ступенчатый, состоящий из трех двухступенчатых секций, в которых последовательно происходит сжатие газа.

Главным (приводным) двигателем компрессора является высоковольтный синхронный неявнополюсный двигатель СТД-10000-2 с нерегулируемой скоростью вращения. Обмотка возбуждения двигателя получает питание от тиристорного возбудителя, который оснащен двумя группами тиристоров, форсировочной и рабочей, микропроцессорным блоком, элементами управления и контроля. Парал-

лельно обмотке возбуждения синхронного двигателя через тиристорный ключ подключается пусковое сопротивление. Имеется блок отключения пускового сопротивления.

Питание главного двигателя компрессоров осуществляется от подстанции, в состав которой входит комплектное распределительное устройство с двумя секциями шин с напряжением 10 кВ.

Пуск компрессора осуществляется от сети с шунтированием обмотки возбуждения на пусковое (гасящее) сопротивление. При достижении подсинхронной скорости при скольжении 0,02 на обмотку возбуждения подается питание от тиристорного возбудителя, пусковое сопротивление отключается.

Модель двигателя СТД-10000, представлена блоком «Synchronous Machine pu Standard» из библиотеки Simulink. Параметры синхронной машины задаются в относительных единицах после проведения дополнительных вычислений.

Модель реакторного пуска двигателя СТД-10000-2 приведена на рисунке 1. Запуск двигателя начинается с подачи напряжения от неограниченного источника напряжения, представленного блоком «Three-Phase Voltage Source» через головной выключатель HQ, замыкающийся через одну секунду от начала моделирования. Последовательно в питающей цепи установлен блок «Three-Phase Parallel RLC Branch» представляющее сопротивление системы. Пуск двигателя начинается со второй секунды от начала моделирования путем включения «пускового» выключатель Q2 последовательно включенного с токоограничивающим реактором «РБ-10-630». Пуск продолжается в асинхронном режиме до достижения подсинхронной скорости, в это время обмотка возбуждения зашунтирована на гасящее сопротивление. В модели гасящее сопротивление представлено блоком «R_шунт». Достигнув подсинхронной скорости, и величины скольжения равной 0,02 от подсистемы «System measurement» подается сигнал «Speed_devation» на логический элемент сравнения с последовательно включенным триггером и логическим ключом. При выполнении условия логический ключ перебрасывается, выводя блок, эмитирующий гасящие сопротивление, после чего осуществляется подача напряжения на обмотку возбуждения. Одновременно с этим выводится пусковой выключатель Q2 и включается рабочий выключатель Q1. Двигатель втягивается в синхронизм и на практике продолжает работать практически без нагрузки до открытия рабочих задвижек, имея на своем валу лишь инерцию компрессора. Момент инерции двигателя компрессора учтен в самой модели, представленный суммарным коэффициентом инерции H(s). Так же в модели присутствует блок механической нагрузки «Mechanical load» для имитации открытия рабочей задвижки.

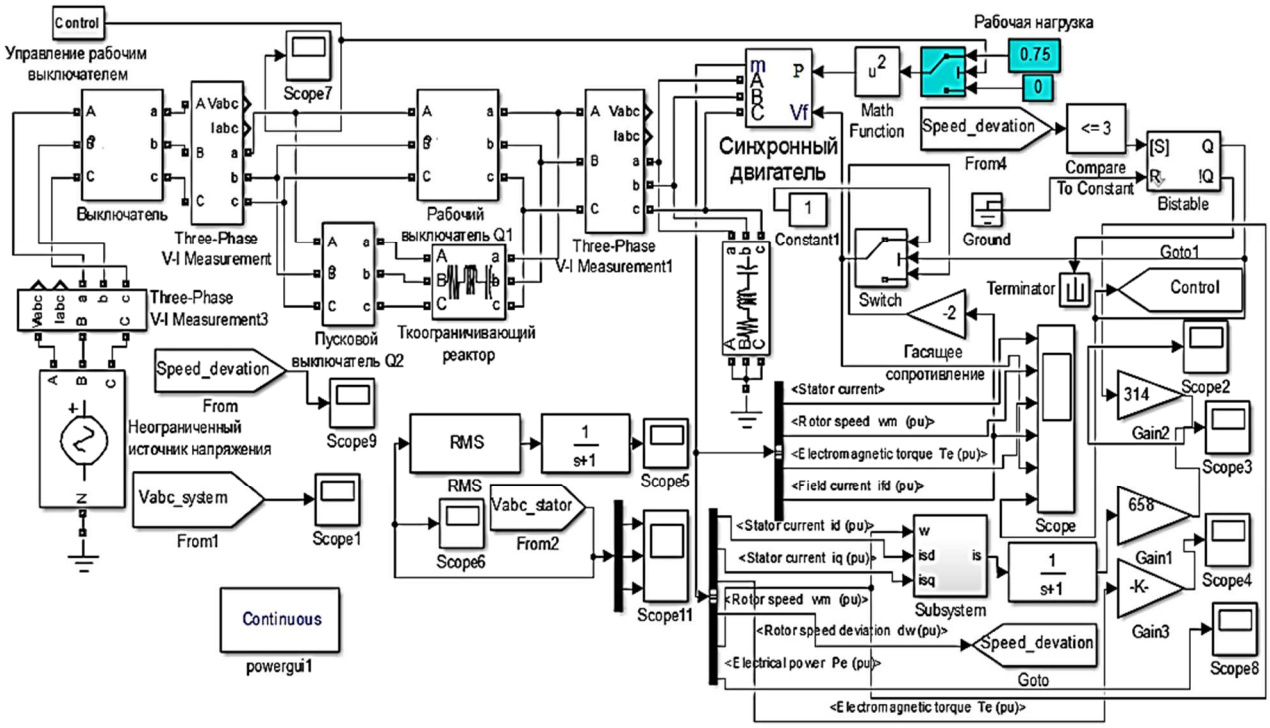

Рисунок 1 – Математическая модель реакторного пуска синхронного двигателя

Полученные при моделировании графики тока и напряжения статора приведены на рисунках 2 и 3. Анализируя полученные переходные процессы, можно сделать вывод, что ток статора при пуске превышает номинальное значение примерно в 5 раз, а действующее значение напряжения примерно в 4 раза меньше номинального значения, при этом время пуска составляет около 16,6 с.

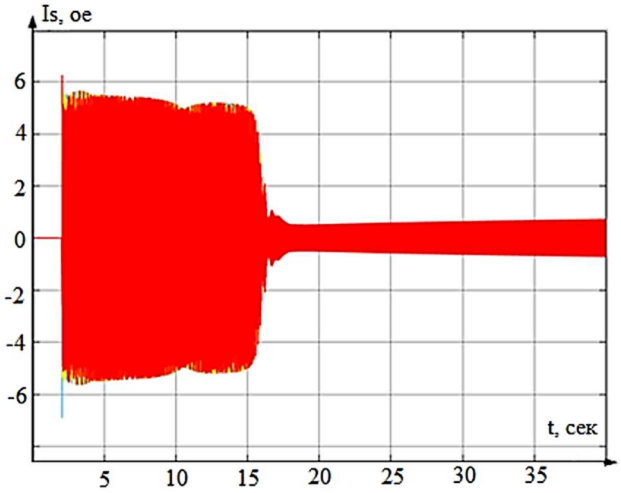

Рисунок 2 – Переходный процесс тока при пуске через токоограничивающий реактор

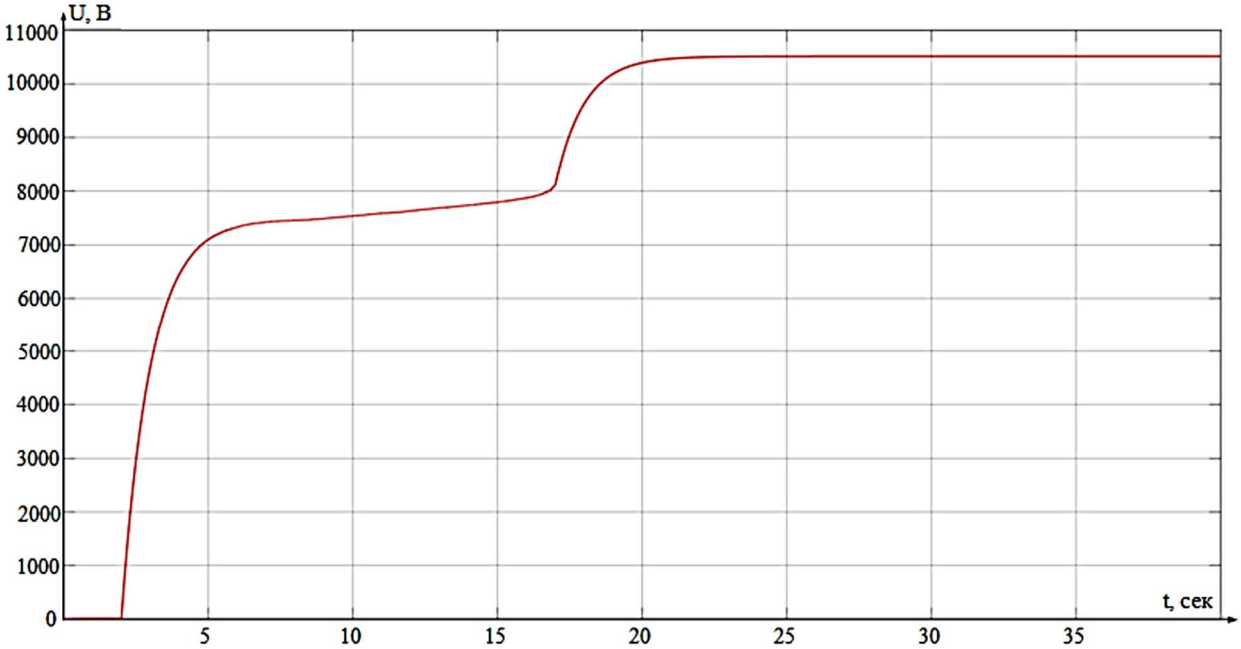

Рисунок 3 – Переходный процесс напряжения при пуске через токоограничивающий реактор

На реальном объекте наблюдался схожий характер протекания переходных процессов.

Снижение пиковых значений пускового тока и просадок напряжения на шинах питающей подстанции можно достигнуть за счет применения устройства безударного (плавного) пуска по схеме тиристорного регулятора напряжения (ТРН) типа УБПВД-ВЦ и устройство частотного плавного пуска серии УБПВД-С, которые обеспечивают снижение ударных нагрузок на систему электроснабжения во время пуск высоковольтных синхронных двигателей.

Устройство УБПВД-ВЦ позволяет осуществлять безударный пуск синхронных двигателей механизмов с «вентиляторной» нагрузкой на валу, обеспечивает ограничение скорости нарастание и значения пускового тока двигателя. В течение заданного времени пуска происходит плавное нарастание напряжения на обмотках статора от нуля до номинального значения. При этом двигатель разгоняется с фиксированным значением пускового тока (для большинства механизмов этот ток составляет 1,5–4 номинала). После достижения двигателем номинальной скорости ток уменьшается до величины, определяемой его фактической нагрузкой. На рисунке 4 представлена модель электропривода компрессора К-1500 № 6 с реализацией режима плавного пуска синхронного двигателя. Формирование плавного нарастания напряжения реализуется при помощи задатчика интенсивности, который создает линейное нарастание напряжения на статоре двигателя с требуемым темпом, корректируемым обратной связью по току статора. После выхода двигателя на свою рабочую характеристику устройство шунтируется выключателями, двигатель подключается к питающей сети напрямую.

Представленная система позволяет снизить пусковые токи примерно до значений, составляющих трехкратные показатели номинального тока статора (рис. 5), но при этом наблюдается увеличение времени пуска двигателя до 35 с (рис. 6). На основании анализа представленных графиков видно, что использование системы с безударным пуском позволяет снизить влияние запуска синхронного двигателя на энергосистему, что говорит об эффективности предлагаемого метода.

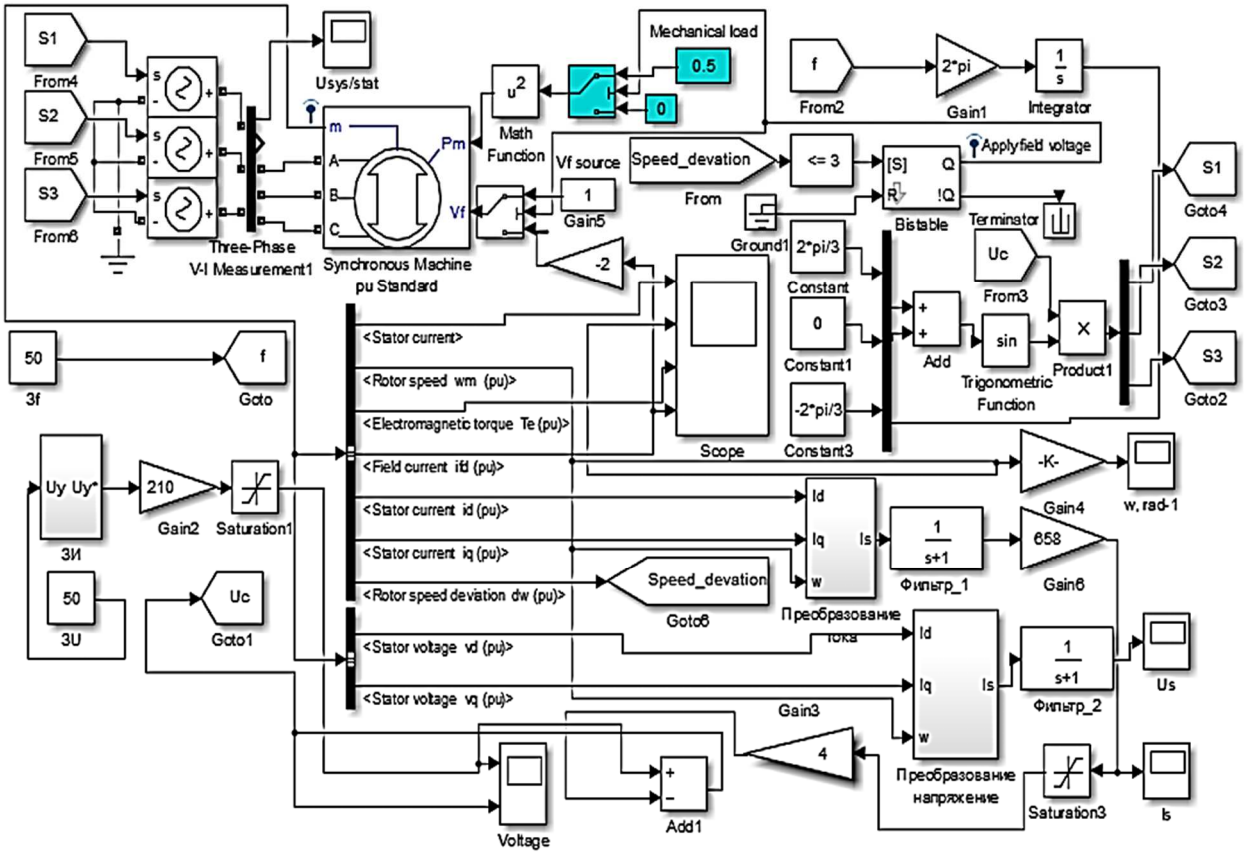

Рисунок 4 – Модель с устройством плавного (безударного) пуска

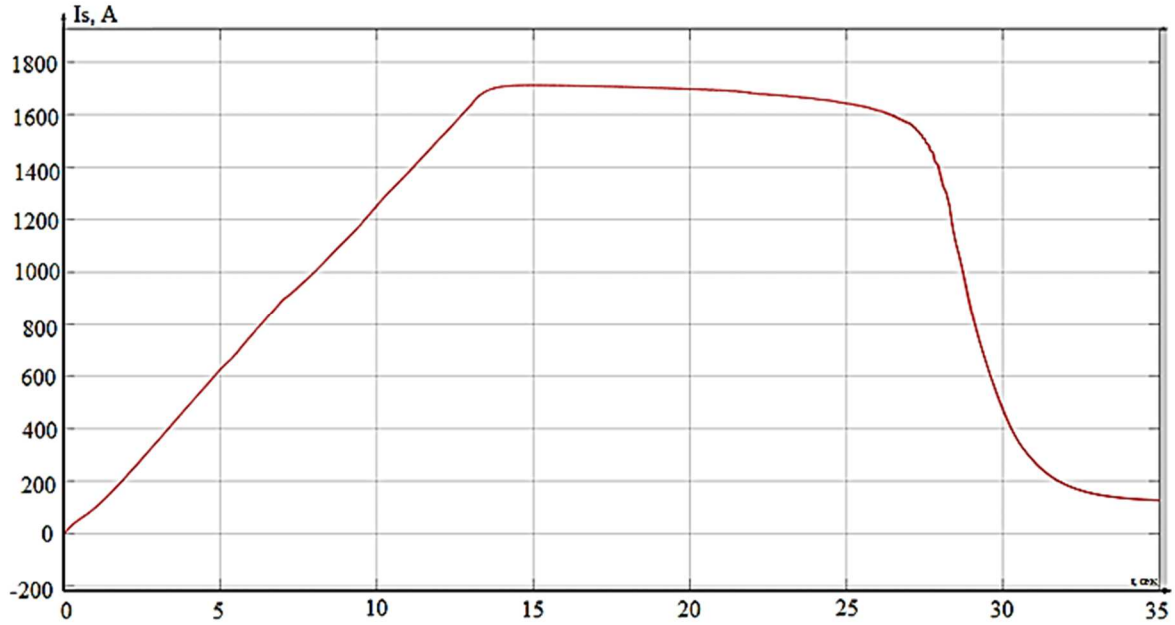

Рисунок 5 – Действующее значение тока статора при плавном (безударном) пуске

Устройство частотного плавного пуска УБПВД-С на базе тиристорного инвертора тока обеспечивает пуск одиночного двигателя. Возможен также пуск одним устройством нескольких двигателей путем его поочередного подключения к запускаемым двигателям. При этом обеспечиваются следующие показатели:

– пусковой момент двигателя превышает до 30 % его номинальное значение;

– частотное регулирование с плавным повышением скорости, автоматическим поддержанием необходимого момента на валу двигателя и током потребления не более 1,5 номинала.

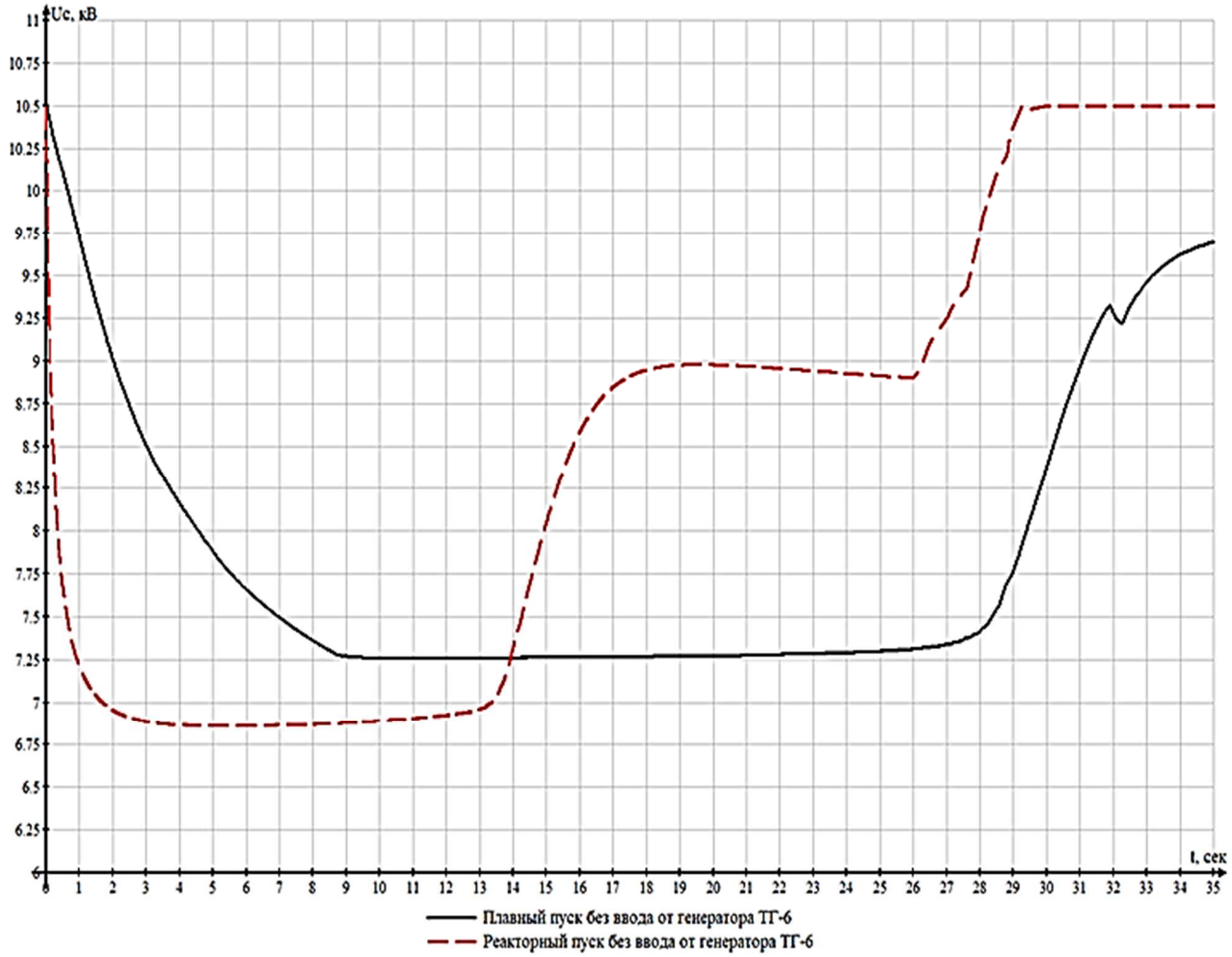

Рисунок 6 – График колебания напряжений при плавном (безударном) пуске

Модель частотного пуска, представленная на рисунке 7, построена на базе предыдущей модели (рис. 4). Задатчик интенсивности формирует изменение частоты и напряжения по закону постоянства момента U / f = const. После выхода двигателя на свою рабочую характеристику устройство шунтируется выключателями, двигатель подключается к питающей сети напрямую.

Данный способ управления запуском двигателя по сравнению с вышеупомянутыми, позволяет снизить пиковое значение тока статора во время пуска до 2,15 номинала. Напряжение статора изменяется плавно. Графики переходных процессов представлены соответственно на рисунке 8 и рисунке 9.

В результате уменьшение величины колебания напряжения на шинах питающей подстанции достигает 20 % при запуске двигателя на рассматриваемую энергосистему. В нормальном режиме колебания напряжения снизились до 25 % в наиболее нагруженном режиме работы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что пуск с применением частотного преобразователя представляется перспективным решением для данного агрегата по сравнению с пуском от ТПН. Кроме того, возможна работа группы двигателей от одного преобразователя частоты.

Проведенное исследование позволяет оценить влияние на систему электроснабжения запуска синхронного электропривода с вентиляторной нагрузкой.

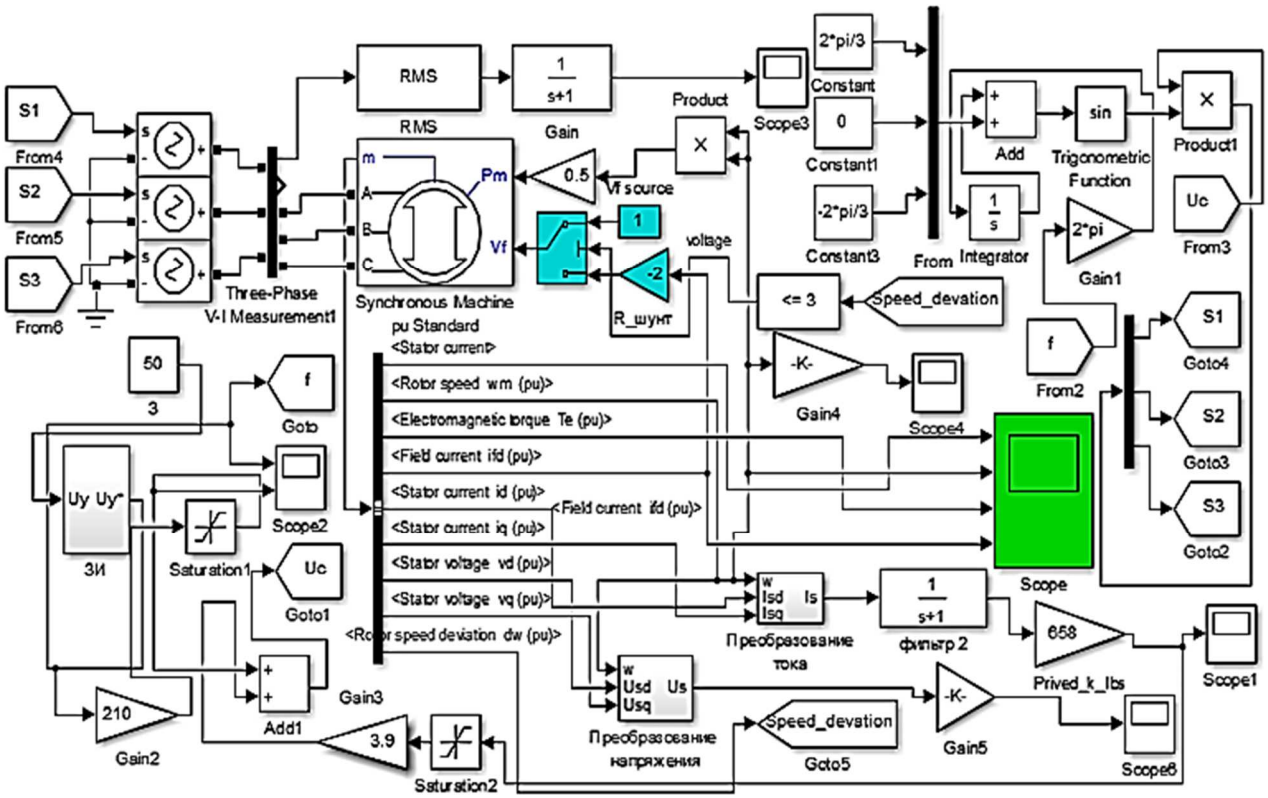

Рисунок 7 – Модель с устройством частотного плавного пуска

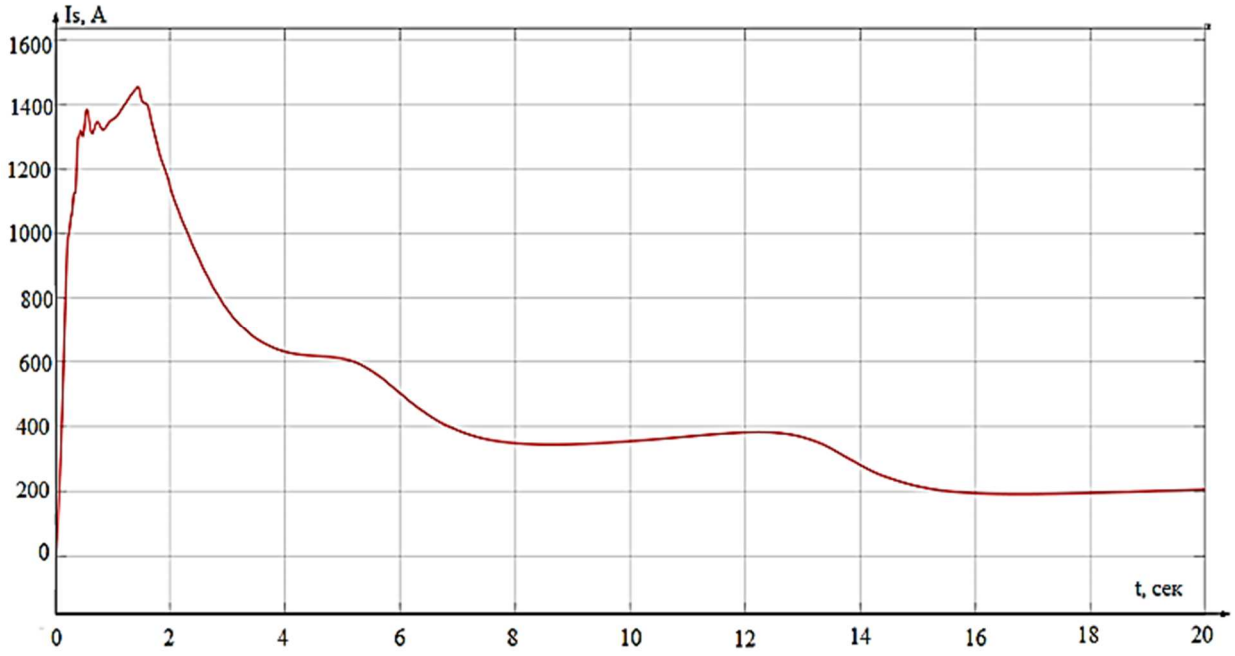

Рисунок 8 – Действующее значение тока статора при частотном пуске

Результаты компьютерного моделирования в среде Matlab Simulink позволяют утверждать, что математическая модель получилась адекватной и соответствует реальной системе. На основе полученных данных были созданы экспериментальные модели с вариантами систем плавного пуска электропривода компрессора на базе синхронного двигателя. Данные системы позволили оценить возможные варианты решения проблемы с посадками напряжения на шинах питающей подстанции, ограничить пиковые механические нагрузки как двигателя, так и механизма, выполнить мягкий (без толчков) пуск, ограничить пусковой ток.

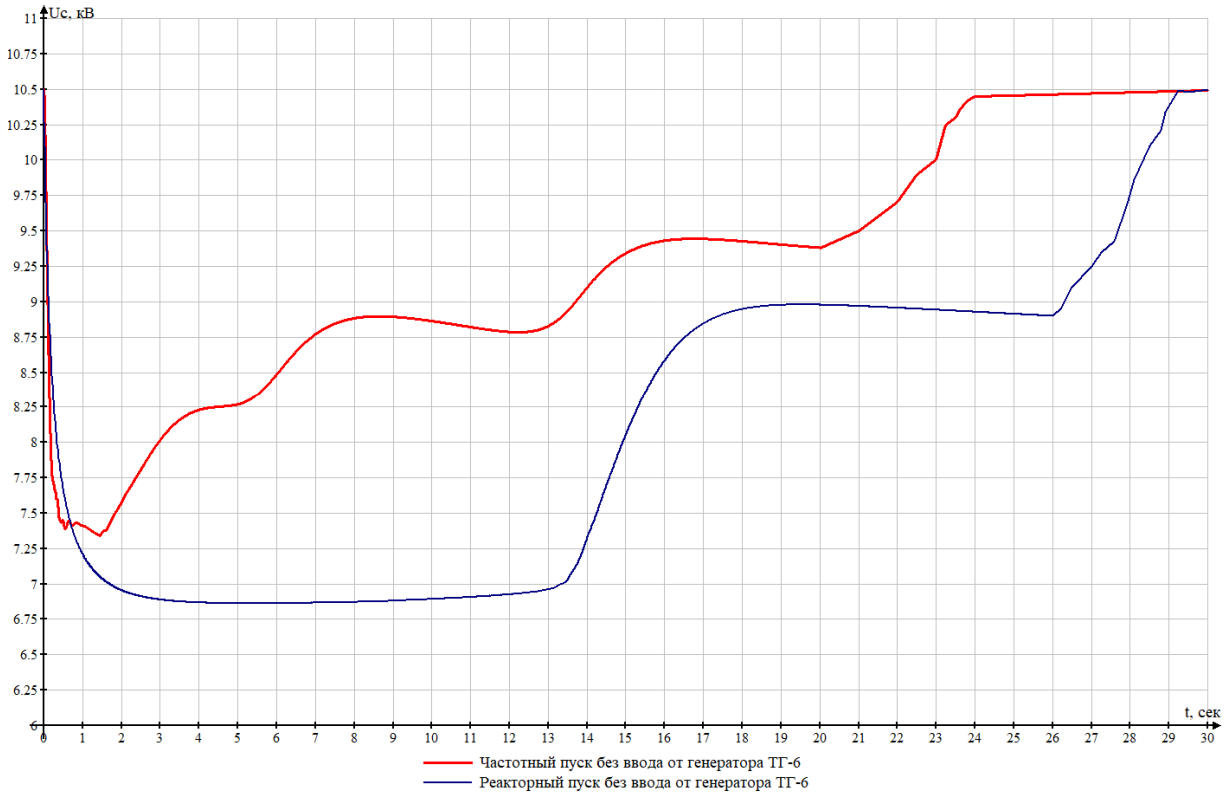

Рисунок 9 – Совмещенный график колебаний напряжения при реакторном и частотном пуске двигателя при нормальной режимной схеме электроснабжения

Следует отметить, что выбор в пользу устройства плавного пуска или частотного пуска необходимо делать при учете технологии производства, в частности, исходя из необходимости регулирования скорости рабочего агрегата. Полученные математические модели электропривода компрессора могут быть использованы с доработками в соответствии с технологическими особенностями для аналогичных механизмов в других отраслях, попутно решая вопросы качества регулирования, оптимизации параметров, энергосбережения, а также лечь в основу создания новых систем регулируемых электроприводов.

Список литературы:

1. Вохидов А.Д. Компенсация реактивной мощности синхронных двигателей насосной станции // Вестник ПИТТУ им. академика М. Осими. – 2018. – № (9). – С. 48–52.
2. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов. Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 50–58.
3. Belousov A.S. Development of a control algorithm for three-phase invertorin two-phase electric drives reducing the number of commutations / A.S. Belousov [et al.]. 2019 1st Internatio nal Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. – P. 444–449.
4. Дадабаев Ш.Т. Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбо механизмов / Х.А. Рахматов, Б.А. Абдумаликов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – № 4. – С. 256–262.

List of references:

1. Vohidov A.D. Compensation of reactive power of synchronous motors of a pumping station // Bulletin of the PITTU named after Academician M. Osimi. – 2018. – № 4(9). – P. 48–52.
2. Kryukov O.V. Monitoring of operating conditions of electric motors of gas pumping units. Control. Diagnostics. – 2016. – № 12. – P. 50–58.
3. Belousov A.S. Development of a control algorithm for three-phase invertorin two-phase electric drives reducing the number of commutations / A.S. Belousov [et al.]. 2019 1st Internatio nal Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. – P. 444–449.
4. Dadabaev Sh.T. Research of technological and transient processes of electric drives of turbo mechanisms / H.A. Rakhmatov, B.A. Abdumalikov // News from TulSU. Technical sciences. – 2017. – № 4. – P. 256–262.