

УДК 621.3:656.56

О.В. Крюков

ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, Россия

**ФОРМИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ
С ВЫЧИСЛИТЕЛЯМИ УГЛА НАГРУЗКИ**

Рассмотрены пути повышения устойчивости синхронного двигателя электроприводных газоперекачивающих агрегатов в функции угла нагрузки в структуре системы регулирования возбуждения. Показано, что суммарная установленная мощность синхронных электроприводов газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистрального транспорта газа составляет более 6000 МВт или 18 % от общей установленной мощности Единой газотранспортной системы России. Аргументированно доказано, что подавляющее число существующих электроприводных агрегатов в настоящее время отработали свой нормативный срок, и для обеспечения надежного транспорта природного газа важнейшей задачей является поэтапная модернизация парка машин и компрессорных агрегатов с применением современных технических решений теории бездатчиковых систем автоматического управления. Разработаны математические модели синхронных машин в разомкнутых и замкнутых системах регулирования. Получены результаты исследований электромагнитных процессов и анализа существующих систем автоматического управления и предлагаемых бездатчиковых вычислителей. Разработан бесконтактный датчик угла нагрузки синхронного двигателя, основанный на измерении доступных параметров машины и позволяющий вычислять угол нагрузки как в статических, так и в динамических режимах работы газоперекачивающих агрегатов, совместно с интеллектуальной системой регулирования. Представлены полученные системы регулирования возбуждения синхронного двигателя с датчиком измерения угла нагрузки, обеспечивающие более высокие показатели в динамических режимах и более быстродействующую защиту от выпадения из синхронизма, а также позволяющие стабилизировать реактивную мощность, коэффициент мощности и напряжение на статоре синхронного двигателя. Результаты расчета и моделирования апробированы на экспериментальных установках при различных режимах.

Ключевые слова: синхронный двигатель, система возбуждения, угол нагрузки, вычислитель, электроприводной газоперекачивающий агрегат.

O.V. Kryukov

JSC «Giprogazcenter», Nizhny Novgorod, Russian Federation

FORMATION OF STABLE OPERATING MODES OF ELECTRIC DRIVES OF TURBOCOMPRESSORS WITH CALCULATORS OF A CORNER OF LOADING

Ways of increase of stability of the synchronous motor of electric driving gas-distributing units as a corner of loading in structure of system of regulation of excitement are considered. Mathematical models of synchronous cars in the opened and closed systems of regulation are developed. Results of researches of electromagnetic processes and the analysis of the existing systems of automatic control and the calculators offered the nonsensor are received. The contactless sensor of a corner of loading of the synchronous motor based on measurement of available parameters of the car and allowing to calculate a corner of loading both in static and in dynamic operating modes of gas-distributing units, together with intellectual system of regulation is developed. The received systems of regulation of excitement of the synchronous motor with the sensor of measurement of a corner of loading providing higher rates in the dynamic modes and more high-speed protection against loss from synchronism and also allowing to stabilize jet power, power factor and tension on the stator of the synchronous motor are presented.

Keywords: synchronous motor, system of excitement, loading corner, calculator, electric driving gas-distributing unit.

Введение. Высокие энергетические показатели и конструктивные преимущества синхронных двигателей обусловили их широкое использование для мощных электроприводов, работающих в продолжительном режиме *SI* и не требующих глубокого регулирования скорости. В современной отечественной и зарубежной промышленности и особенно в энергетических отраслях синхронные машины длительно и эффективно работают в качестве электроприводов дутьевых вентиляторов, воздуходувок, буровых установок, компрессоров, насосов, шаровых мельниц, прокатных станов и прочих ответственных механизмов. Так, например, суммарная установленная мощность синхронных электроприводов газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС) магистрального транспорта газа (рис. 1) составляет более 6000 МВт или 18 % от общей установленной мощности Единой газотранспортной системы России [1–4]. График их нагрузки может длительное время оставаться постоянным, а момент на валу двигателя изменяется незначительно и весьма плавно в зависимости от сезонного потребления газа, колебаний температуры окружающего воздуха или перехода на другие графики газоподдачи. При этом, однако, из-за параллельной работы ЭГПА с различными типами центробежных нагнетателей возможны неустойчивые режимы с субгармоническими колебаниями выходных параметров ЭГПА [5–8].

Подавляющее число существующих ЭГПА в настоящее время отработали свой нормативный срок, и для обеспечения надежного транспорта природного газа важнейшей задачей является поэтапная модернизация парка машин и компрессорных агрегатов с применением современных технических решений, которые проводятся в двух направлениях. Во-первых, это перевод аппаратных средств на современную элементную базу, во-вторых, это модернизация путем совершенствования законов регулирования и структур систем регулирования и возбуждения синхронного двигателя.



Рис. 1. Общий вид электроприводного газоперекачивающего агрегата КС

Таким образом, повышение эффективности и надежности работы синхронного двигателя ЭГПА достигается решением следующих задач [9–15]:

- увеличением перегрузочной способности и повышением устойчивости синхронного двигателя при набросе нагрузки или колебаниях напряжения в сети;
- демпфированием механических колебаний ротора;
- обеспечением минимальных потерь в двигателе и питающей сети;
- уменьшением колебаний активной, реактивной мощности и напряжения в питающей сети.

Поскольку одновременное решение всех указанных задач затруднительно из-за наличия единственного канала управляющего воздействия через систему возбуждения синхронного двигателя, закон управления током возбуждения выбирается в соответствии с детерминированным или стохастическим характером нагрузки электроприводных газоперекачивающих агрегатов.

Для синхронного двигателя с постоянной или медленно изменяющейся нагрузкой задание на ток возбуждения формируется в соответствии с векторной диаграммой статического режима синхронного двигателя в зависимости от нагрузки на валу двигателя и напряжения питающей сети. При этом автоматический регулятор возбуждения (АРВ) настраивается на поддержание постоянства реактивной мощности или коэффициента мощности синхронного двигателя. Однако такой регулятор не позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя при быстро меняющихся нагрузках, которые вызывают значительные качания ротора синхронного двигателя в динамических режимах, включая запуск электроприводных газоперекачивающих агрегатов.

Устойчивость и надежность синхронного электропривода, рациональное использование синхронного двигателя и эффективность технологического процесса во многом определяются структурой системы АРВ и ее быстродействием. Существующие системы автоматического регулирования возбуждения поддерживают на заданном уровне ток возбуждения и реактивный ток с коррекцией по напряжению сети, но не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к работе синхронного двигателя в динамических режимах. Поэтому актуальной является задача улучшения динамических характеристик синхронного двигателя в условиях действия возмущений в виде изменения момента нагрузки или напряжения статора.

Модель управляемого синхронного двигателя электроприводного газоперекачивающего агрегата. Наиболее совершенным информативным параметром, однозначно определяющим момент выхода двигателя из синхронизма, является угол нагрузки δ . Система автоматического регулирования возбуждения с улучшенными динамическими характеристиками должна обеспечивать устойчивую работу синхронного двигателя в переходных режимах при минимуме колебаний активной и реактивной мощности, демпфировать качания ротора и активного тока статора, ограничивать максимальное отклонение угла

нагрузки δ синхронного двигателя, снижать отрицательное влияние двигателя на питающую сеть, минимизировать потери электрической энергии в системе электропривода.

Повышение надежности работы синхронного двигателя тесно связано с управлением возбуждением в аварийных и предаварийных режимах. В существующих возбудителях момент выпадения двигателя из синхронизма выявляется по факту появления периодической составляющей в токе возбуждения. Срабатывание защиты зависит от соотношения периодической и постоянной составляющих в токе возбуждения, что не всегда позволяет выявить момент выпадения двигателя из синхронизма. При малых же токах возбуждения защита может срабатывать и в синхронных режимах работы синхронного двигателя под действием кратковременных возмущений.

С точки зрения повышения динамической устойчивости и эффективного гашения качаний ротора синхронного двигателя электроприводного газоперекачивающего агрегата наиболее совершенной признана система автоматического регулирования возбуждения, которая работает в функции угла нагрузки δ ротора двигателя и его производной [16–20]. При этом информация о мгновенном значении угла нагрузки δ позволяет прогнозировать момент выпадения синхронного двигателя из синхронизма и своевременно форсировать возбуждение, предотвращая асинхронный ход двигателя. Демпфирование колебаний ротора осуществляется посредством форсировок возбуждения в соответствии со значением скорости изменения угла нагрузки.

Однако непосредственное измерение угла нагрузки δ с использованием магнитоэлектрических или вращающихся датчиков положения ротора требует серьезного вмешательства в конструкцию двигателя, что повышает стоимость электроприводного газоперекачивающего агрегата и снижает его эксплуатационную надежность.

Наиболее приемлемым с практической точки зрения вариантом решения данной задачи является использование методов косвенного определения угла нагрузки δ с помощью микропроцессорного идентификатора параметров синхронного двигателя, вычисляющего δ с малой динамической погрешностью без использования датчиков внутри или на валу двигателя. Такой идентификатор может быть не чувствителен к разбросу параметров электромагнитной цепи синхронного двигателя и надежен при длительной эксплуатации.

Поскольку начальное значение потокосцепления обмотки возбуждения $\Psi_f(0)$ (потокосцепление обмотки возбуждения в начальный момент времени) известно из уравнений, соответствующих установившемуся режиму работы синхронного двигателя, то потокосцепление Ψ_f (потокосцепление обмотки возбуждения) в переходном режиме определяется по напряжению возбуждения U_f и току возбуждения I_f .

Потокосцепление обмотки возбуждения и потокосцепление статора синхронного двигателя Ψ_{sd} по продольной оси связаны с токами в контурах машины и индуктивностями рассеяния статора и обмотки возбуждения. Продольный ток статора i_{sd} может быть определен лишь при известных значениях угла нагрузки δ , активного и реактивного тока статора. Если ток i_{sx} соответствует реактивному току статора и ориентирован вдоль вектора потокосцепления статора $\Psi_s = (\Psi_{sd} + j\Psi_{sq})$, а ток i_{sy} соответствует активному току статора и совпадает с вектором напряжения статора $U_s = (U_{sd} + jU_{sq})$, то угол нагрузки δ является углом сдвига между координатными осями dq .

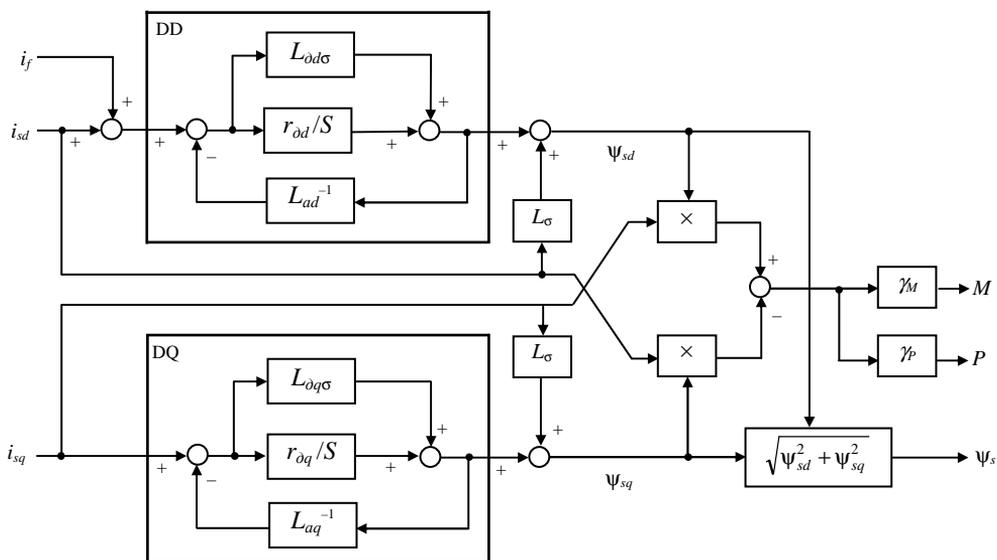


Рис. 2. Упрощенная математическая модель синхронного двигателя

Для вычисления угла нагрузки по аналитическим формулам напряжение статора U_s и ток возбуждения i_f измеряются непосредственно, а потокосцепление Ψ_f вычисляется косвенно. Активный i_{sy} и реактивный i_{sx} токи статора вычисляются через фазные токи и напряжения статора в физических координатах.

На рис. 2 представлена упрощенная структурная схема математической модели синхронного двигателя, построенная на базе системы уравнений, которые необходимы для реализации АРВ с идентификатором угла нагрузки. Входные переменные модели синхронного двигателя – продольный i_{sd} , поперечный i_{sq} токи статора и ток возбуждения i_f , выходные переменные – электромагнитный момент M , активная мощность P и потокосцепление статора ψ_s . Блоки DD и DQ учитывают в модели демпферные контуры синхронного двигателя по продольной и поперечной осям соответственно.

Особенности системы автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя. Назначение системы автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя заключается в поддержании тока возбуждения i_f и продольной и поперечной составляющих тока статора i_{sd} , i_{sq} соответственно, необходимых для обеспечения требуемого электромагнитного состояния синхронного двигателя при изменениях момента нагрузки или напряжения статора. Автоматическое регулирование возбуждения позволяет стабилизировать один из следующих параметров: реактивную мощность Q , напряжение статора u_s , коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Регулятор тока возбуждения (РТВ) системы автоматического регулирования синхронного двигателя (рис. 3) компенсирует постоянную времени обмотки возбуждения и обеспечивает требуемое быстродействие в контуре регулирования тока возбуждения.

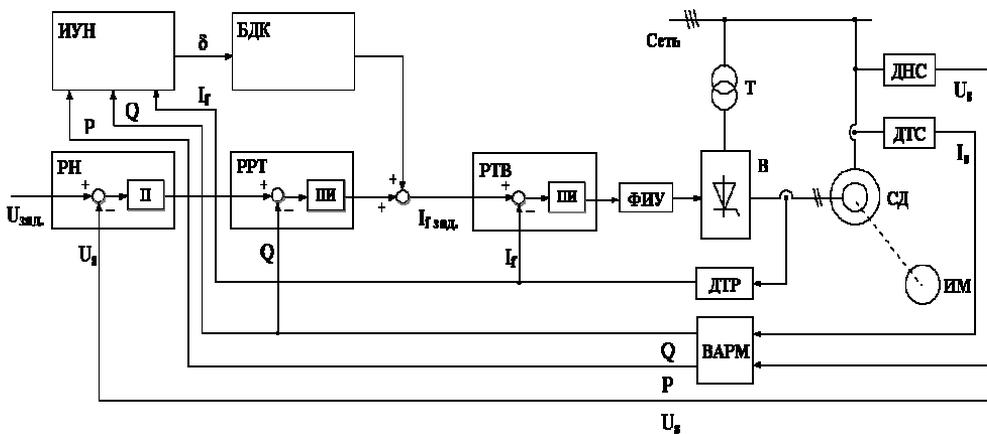


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического регулирования возбуждения синхронного двигателя с идентификатором угла нагрузки

Регулятор реактивного тока (реактивной мощности) необходим для обеспечения энергоэкономичного режима работы двигателя. В тех случаях, когда узел нагрузки не испытывает дефицита реактивной мощности, оптимальным является режим работы синхронного двигателя с $\cos \varphi$, близким к 0,9, не связанный с потреблением реактивной мощности из сети и обеспечивающий минимум электрических потерь и благоприятный тепловой режим двигателя. Регулятор напряжения обеспечивает стабилизацию напряжения в узле нагрузки путем изменения величины реактивной мощности, потребляемой или генерируемой двигателем в сеть.

Блок демпфирования колебаний ротора синхронного двигателя предназначен для ограничения амплитуды колебаний ротора, снижения колебаний активной и реактивной мощности синхронного двигателя. Тем самым повышается устойчивость и надежность работы двигателя при ударном приложении нагрузки.

Регулирование тока возбуждения в целях демпфирования качаний ротора осуществляется по углу нагрузки δ и его производной, которые являются параметрами, непосредственно определяющими устойчивость двигателя. Угол нагрузки δ и его производная вычисляются идентификатором угла нагрузки в трехконтурной системе автоматического регулирования возбуждением синхронного двигателя.

Для обеспечения оптимального качества переходного процесса (колебательность активного и реактивного тока статора, амплитуда качаний ротора, длительность переходного процесса) при резких изменениях электромагнитной мощности $P_{эм}$ необходимо в динамике поддерживать заданный режим Q^* . В предлагаемой системе автоматического регулирования возбуждения обеспечивается минимум отклонения от заданного закона регулирования при сложном характере изменения нагрузки на валу СД в широких пределах.

Формирование заданий для потокосцеплений ψ_{sd}^* , ψ_{sq}^* (блок Ψ_s) происходит с учетом структурных свойств двигателя как объекта регулирования. Значения ψ_{sd}^* , ψ_{sq}^* подчинены заданным токам i_{sd}^* , i_{sq}^* , вычисляемым в блоке I_s , и заданию потокосцепления ψ_s^* . Последнее формируется пропорциональным регулятором напряжения (РН) или определяется напряжением статора. Входными переменными блока I_s являются активная мощность P и реактивная мощность Q статора синхронного двигателя, а выходными – токи i_{sd}^* , i_{sq}^* , i_{sd}^O . Задания на ток возбуждения i_f^* и сигнал ошибки на входе ПИ-регулятора тока

возбуждения вычисляются в блоке I_f . Электромагнитная инерция цепи возбуждения характеризуется переходной постоянной времени. Компенсировать постоянную времени обмотки возбуждения и обеспечить требуемое быстродействие в контуре регулирования тока возбуждения позволяет ПИ-регулятор, параметры которого определяются в результате оптимизации дифференциального уравнения для цепи возбуждения.

Микропроцессорный идентификатор угла нагрузки синхронного двигателя. Идентификатор угла δ должен вычислять значение угла нагрузки по легко измеряемым координатам синхронного двигателя (току i_f и напряжению u_f цепи возбуждения, активному и реактивному токам и напряжению статора). Для вычисления угла нагрузки напряжение статора u_s и ток возбуждения i_f (рис. 4) измеряются непосредственно, а потокосцепление ψ_f вычисляется в соответствии с математической моделью. Активный i_{sy} и реактивный i_{sx} токи статора вычисляются через фазные токи и напряжения статора в физических координатах. Таким образом, для косвенного измерения угла нагрузки используются сигналы датчика тока возбуждения (ДТР), датчика напряжения возбуждения (ДНР), датчика тока (ДТС) и напряжения (ДНС) статора (см. рис. 3). При выборе элементной базы информационной части системы автоматического регулирования следует ориентироваться на программируемый логический контроллер, применение которого не только повышает надежность системы в целом, но и снижает затраты на ее проектирование, изготовление, наладку и возможный ремонт [21–24].

Разработанная система автоматического регулирования возбуждения позволяет стабилизировать реактивную мощность, коэффициент мощности, напряжение на статоре синхронного двигателя. Идентификатор угла нагрузки синхронного двигателя (см. рис. 4) позволяет вычислять угол δ как в статических, так и в динамических режимах работы машины, благодаря чему возможно обеспечение своевременной форсировки возбуждения, предупреждающей переход двигателя в асинхронный режим.

Разработанные модели синхронного двигателя, системы автоматического регулирования возбуждением и идентификатора угла нагрузки двигателя позволяют производить математическое моделирование динамических режимов системы АРВ – СД на персональном компьютере (ПК). Полученные с помощью моделирования графики переходных процессов подтверждают работоспособность системы автоматического регулирования возбуждением и идентификатора угла нагрузки.

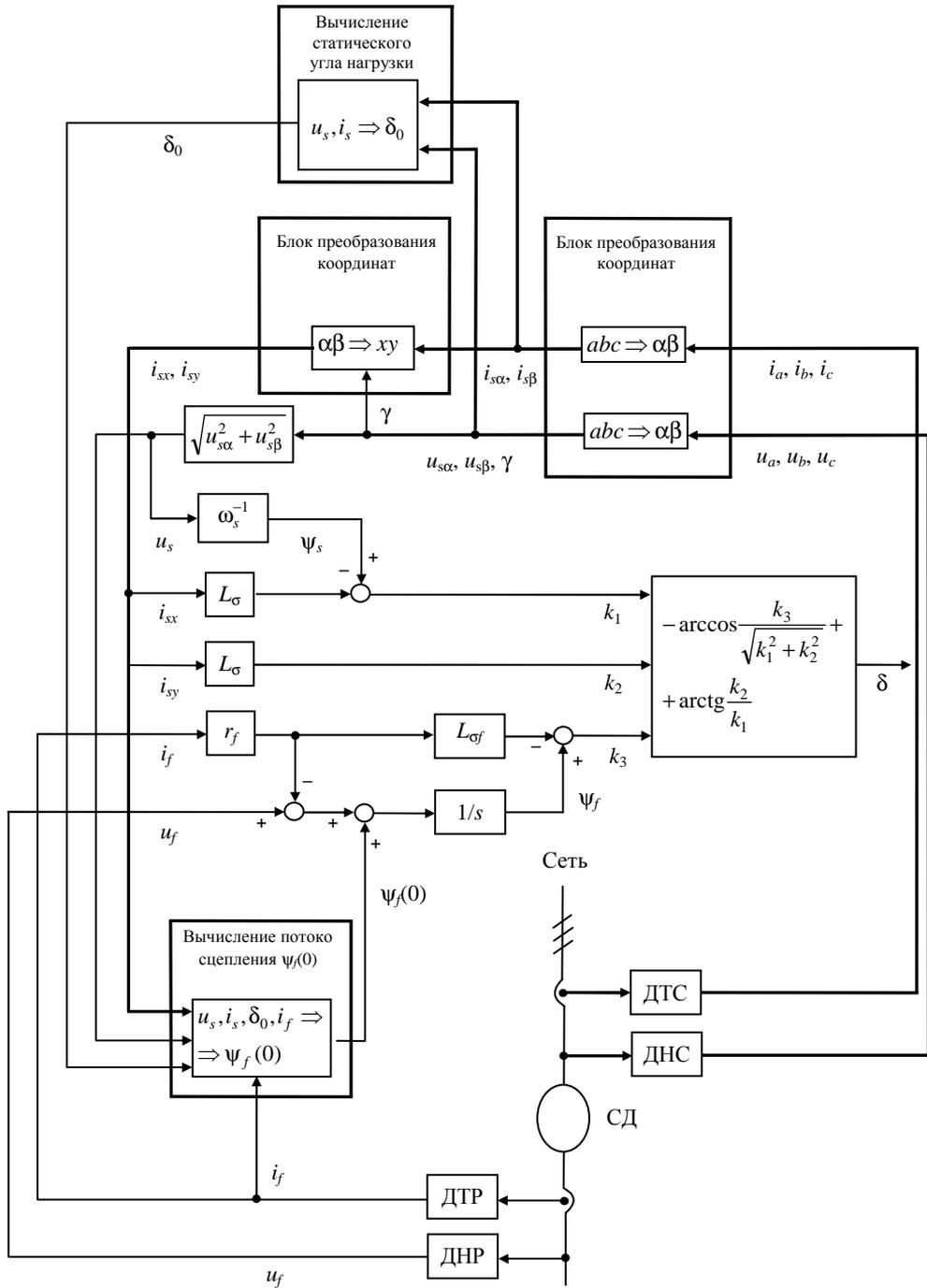


Рис. 4. Структурная схема идентификатора угла нагрузки синхронного двигателя

Для проверки работоспособности идентификатора угла нагрузки разработана модель синхронного двигателя с идентификатором угла нагрузки и его производной для ПК. При моделировании было введено допущение, что параметры схемы замещения синхронного двигателя известны точно и являются неизменными, а помеха на входе интегратора отсутствует. В результате моделирования работы идентификатора при сбросе и набросе нагрузки синхронного двигателя получены графики потокосцепления обмотки возбуждения ψ_f и угла нагрузки δ синхронного двигателя, а также изменения скольжения ротора S (производной угла нагрузки).

Графики переходных процессов в системе АРВ–СД свидетельствуют о незначительных отклонениях реактивного тока синхронного двигателя от заданного значения при снижении колебаний активного тока статора, что подтверждает предположение об адекватности и приемлемой точности работы идентификатора в динамических режимах работы синхронного двигателя.

Анализ работы системы. Для проверки работоспособности идентификатора угла нагрузки в среде Simulink разработана соответствующая структурная схема синхронного двигателя с идентификатором угла нагрузки и его производной [25–32]. В результате моделирования работы идентификатора при сбросе и набросе нагрузки синхронного двигателя получены графики потокосцепления обмотки возбуждения Ψ_f и угла нагрузки δ синхронного двигателя (рис. 5). Также представлены графики изменения скольжения ротора S (производной угла нагрузки).

Результаты моделирования на ПК свидетельствуют о высокой точности разработанной системы автоматического регулирования и алгоритмов косвенного измерения угла нагрузки по токам и напряжениям в статорных контурах синхронного двигателя и в его обмотке возбуждения без использования дорогостоящих датчиков, размещенных внутри и на валу синхронного электродвигателя.

Выводы

1. Разработаны принципы построения идентификатора угла нагрузки синхронного двигателя и структурная схема его реализации. Показано, что расчетные значения угла δ по разработанной модели имеют максимальную ошибку по отношению к экспериментальным данным не более 7 %.

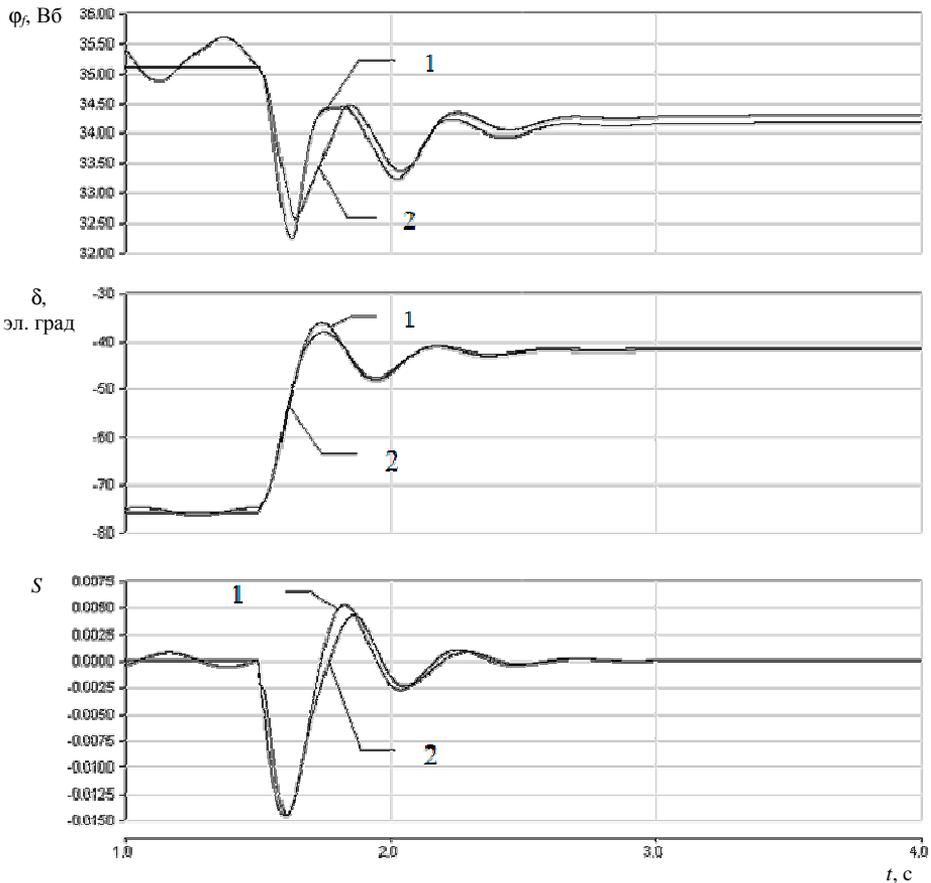


Рис. 5. Идентификация угла нагрузки и скольжения ротора при сбросе нагрузки от 2,0 до 0,5 $M_{ном}$: 1 – теоретические изменения значений величин; 2 – значения величин, вычисляемые косвенно

2. В рамках модернизации систем автоматического регулирования возбуждением синхронного двигателя электроприводных газоперекачивающих агрегатов разработаны модели синхронного двигателя и структурные схемы автоматического регулирования возбуждением и микропроцессорного идентификатора угла нагрузки машины. Математическое моделирование динамических режимов системы АРВ–СД на ПК подтвердило адекватность косвенного вычисления угла нагрузки синхронного двигателя с приемлемой точностью.

3. Разработана система автоматического регулирования возбуждением синхронного двигателя, позволяющая учитывать изменение угла δ с воздействием на ток возбуждения, чем снижаются колебания

ротора при изменении возмущения для различных законов управления. При этом существенно снижаются и демпфируются колебания ротора, тока возбуждения (2–3 колебания против 7–8 колебаний в классическом варианте системы АРВ). Наиболее тяжелым является режим поддержания заданного $\cos\varphi$, при котором при набросе и сбросе нагрузки время переходного процесса в 2–3 раза больше. Особенно это проявляется при ограничении максимального напряжения возбуждения.

4. Разработанная система АРВ позволяет стабилизировать реактивную мощность, коэффициент мощности и напряжение на статоре синхронного двигателя. Идентификатор угла нагрузки синхронного двигателя позволяет вычислять угол δ как в статических, так и в динамических режимах работы синхронного двигателя, благодаря чему возможно обеспечение своевременной форсировки возбуждения, предупреждающей переход двигателя в асинхронный режим.

Библиографический список

1. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло, С.В. Савченков, Е.А. Спиридович [и др.]; под ред. д-ра техн. наук. О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 570 с.

2. Аникин Д.А., Рубцова И.И., Крюков О.В. Проектирование систем управления ЭГПА // Газовая промышленность. – 2009. – № 2. – С. 44–47.

3. Захаров П.А., Киянов Н.В., Крюков О.В. Системы автоматизации технологических установок для эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 6–10.

4. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – С. 157–163.

5. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2010. – № 12. – С. 24–31.

6. Крюков О.В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество. – 2008. – № 9. – С. 45–51.

7. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – № 2. – С. 5–10.

8. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3(19). – С. 209–212.

9. Милов В.Р., Суслов Б.А., Крюков О.В. Интеллектуализация поддержки управленческих решений в газовой отрасли // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 12. – С. 16–20.

10. Крюков О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 10. – С. 50–53.

11. Крюков О.В. Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С. 43–46.

12. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности электроприводных ГПА // Газовая промышленность. – 2014. – № 6(707). – С. 86–89.

13. Крюков О.В. Регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов преобразователями частоты // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 3. – С. 21–24.

14. Крюков О.В. Частотное регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 6. – С. 39–43.

15. Милов В.Р., Шалашов И.В., Крюков О.В. Процедуры прогнозирования и принятия решений системе технического обслуживания и ремонта // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 8. – С. 47–49.

16. Степанов С.Е., Крюков О.В., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газокompрессорных станций // Автоматизация в промышленности. 2010. – № 6. – С. 29–31.

17. Крюков О.В., Степанов С.Е. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2014. – № 8(710). – С. 50–56.

18. Крюков О.В., Горбатушков А.В., Степанов С.Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В.Ю. Островляничика. – Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.

19. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

20. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях: тр. МНПК АПА-2011. – М., 2011. – С. 329–350.

21. Крюков О.В. Мультипроцессорные системы управления автоматизированным электроприводом объектов газотранспортных систем // Газовая промышленность. – 2014. – № 11(714). – С. 60–63.

22. Крюков О.В. Тензометрические датчики момента с микропроцессорным вычислителем // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – № 2. – С. 25–32.

23. Крюков О.В. Интеллектуальные электроприводы с ИТ-алгоритмами // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 36–39.

24. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2015. – С. 368–386.

25. Крюков О.В. Моделирование и микропроцессорная реализация электромеханических систем // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 55–61.

26. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло [и др.]; под ред. О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2011. – Т.2. – 664 с.

27. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 7. – С. 33–39.

28. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями: монография. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ. – 2007. – 260 с.

29. Kryukov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms // Automation and Remote Control. – 2013. – Т. 74. – № 6. – С. 1043–1048.
30. Бабичев С.А., Бычков Е.В., Крюков О.В. Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 30–36.
31. Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов объектов магистральных газопроводов // Тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев. – 2014. – С. 409–414.
32. Крюков О.В., Степанов С.Е. Модернизация систем управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами в условиях действующих компрессорных станций // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб. ст. МНТК / под ред. М.А. Щербакова. – Пенза, 2013. – С. 29–32.

References

1. Puzhailo A.F. [et al.]. Energoberezhenie i avtomatizatsiia elektrooborudovaniia kompressornykh stantsii [Energy saving and automation of compressor stations' electric equipment]. Nizhniy Novgorod: Vektor TiS, 2010. 570 p.
2. Anikin D.A., Rubtsova I.I., Kriukov O.V. Proektirovanie sistem upravleniia EGPA [EGPA management systems design]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2009, no. 2, pp. 44-47.
3. Zakharov P.A., Kiianov N.V., Kriukov O.V. Sistemy avtomatizatsii tekhnologicheskikh ustanovok dlia effektivnogo transporta gaza [Process installations' automation systems for the efficient gas transport]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2008, no. 6, pp. 6-10.
4. Kriukov O.V. Opyt sozdaniia energoeffektivnykh elektroprivodov gazoperekachivaiushchikh agregatov [Creation experience of energy-efficient electric motors for gas-compressor units]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. Saransk, 2014, vol. 2, pp. 157-163.
5. Babichev S.A., Kriukov O.V., Titov V.G. Avtomatizirovannaia sistema bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Automated security electrically driven gas pumping units]. *Elektrotekhnika*, 2010, no. 12, pp. 24-31.

6. Kriukov O.V. Regressionnyye algoritmy invariantnogo upravleniia elektroprivodami pri stokhasticheskikh vozmushcheniiakh [Regression algorithms of invariant electrical drive control under stochastic perturbations]. *Elektrichestvo*, 2008, no. 9, pp. 45-51.

7. Kriukov O.V., Stepanov S.E., Titov V.G. Vstroennyye sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoianiia elektroprivodov dlia energo-cheskoi bezopasnosti transporta gaza [Electric drives technical condition monitoring integrated systems for gas transport energy security]. *Energo bezopasnost' i energosberezhenie*, 2012, no. 2, pp. 5-10.

8. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Puti modernizatsii elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Ways of electrically driven gas-compressor units modernization]. *Elektromekhanichni i energozberigaiuchi sistemi*, 2012, no. 3(19), pp. 209-212.

9. Milov V.R., Suslov B.A., Kriukov O.V. Intellektualizatsiia podderzhki upravlencheskikh reshenii v gazovoi otrasli [Support intellectualization of management decisions in the gas industry]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 12, pp. 16-20.

10. Kriukov O.V. Analiz i tekhnicheskaiia realizatsiia faktorov energoeffektivnosti innovatsionnykh reshenii v elektroprivodnykh turbokompressorakh [Analysis and technical implementation of energy efficiency factors of innovative solutions for electric turbo compressor]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 10, pp. 50-53.

11. Kriukov O.V. Vstroennaia sistema diagnostirovaniia i prognozirovaniia raboty asinkhronnykh elektroprivodov [Built-in diagnostics and forecasting system of asynchronous electric drives performance]. *Izvestiia vuzov. Elektromekhanika*, 2005, no. 6, pp. 43-46.

12. Kriukov O.V., Krasnov D.V. Perspektivy primeneniia preobrazovatelei chastoty dlia regulirovaniia proizvoditel'nosti elektroprivodnykh GPA [Prospects of frequency converters use for the electrically driven gas pumping units performance control]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 6(707), pp. 86-89.

13. Kriukov O.V. Regulirovanie proizvoditel'nosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov preobrazovateliami chastoty [Performance control of electrically driven gas pumping units with frequency converters use]. *Kompressornaia tekhnika i pnevmatika*, 2013, no. 3, pp. 21-24.

14. Kriukov O.V. Chastotnoe regulirovanie proizvoditel'nosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Frequency con-

trol of electrically driven gas pumping units performance]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2014, no. 6, pp. 39-43.

15. Milov V.R., Shalashov I.V., Kriukov O.V. Protsedury prognozirovaniia i priniatiia reshenii sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniia i remonta [Forecasting and decision-making procedures of maintenance and repair system]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 8, pp. 47-49.

16. Stepanov S.E., Kriukov O.V., Plekhov A.S. Printsipy avtomaticheskogo upravleniia vozbuзhdeniem sinkhronnykh mashin gazokompressornykh stantsii [Automatic control principles of synchronous machines gas compressor stations excitation]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 6, pp. 29-31.

17. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Povыshenie ustoichivosti raboty elektroprivodov tsentrobezhnykh nagnetatelei na kompressornykh stantsiiakh OAO «Gazprom» [Stability enhancement of the electric centrifugal compressors at the compressor stations of PAO "Gazprom"]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 8(710), pp. 50-56.

18. Kriukov O.V., Gorbatushkov A.V., Stepanov S.E. Printsipy postroeniia invariantnykh elektroprivodov energeticheskikh ob"ektov [Principles of invariant electric power facilities design]. *Trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennaia elektronika"*. Novokuznetsk, 2010. pp. 38-45.

19. Kriukov O.V. Virtual'nyi datchik nagruzki sinkhronnykh mashin [Synchronous machines' virtual load cell]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2014, no. 3, pp. 45-50.

20. Kriukov O.V. Kompleksnaia sistema monitoringa i upravleniia elektroprivodnymi gazoperekachivaiushchimi agregatami [Comprehensive monitoring and management system of electrically driven gas pumping units]. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Peredovye informatsionnye tekhnologii, sredstva i sistemy avtomatizatsii i ikh vnedrenie na rossiiskikh predpriiatiakh" AITA-2011*. Moscow, 2011, pp. 329-350.

21. Kriukov O.V. Mul'tiprotsessornye sistemy upravleniia avtomatizirovannym elektroprivodom ob"ektov gazotransportnykh sistem [Multi-processor control systems of electrically automated facilities of gas transmission systems]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 11(714), pp. 60-63.

22. Kriukov O.V. Tenzometricheskie datchiki momenta s mikroprotsessornym vychislitelem [Strain gage moment transducer with

microprocessor calculator]. *Kompressornaia tekhnika i pnevmatika*, 2015, no. 2, pp. 25-32.

23. Kriukov O.V. Intellektual'nye elektroprivody s IT-algoritmami [Smart electric motors with IT-algorithms]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2008, no. 6, pp. 36-39.

24. Kriukov O.V. Strategii invariantnykh sistem upravleniia elektroprivodami ob"ektov OAO «Gazprom» [Strategies of invariant electrical control systems of PAO "Gazprom" facilities]. *Identifikatsiia sistem i zadachi upravleniia SICPRO'15*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2015. pp. 368-386.

25. Kriukov O.V. Modelirovanie i mikroprotsessornaia realizatsiia elektromekhanicheskikh sistem [Modeling and microprocessor implementation of electromechanical systems]. *Elektrotekhnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 55-61.

26. Puzhailo A.F. [et al.]. Energoberezhenie i avtomatizatsiia elektrooborudovaniia kompressornykh stantsii [Energy-saving and automatization of compressor stations electrical equipment]. Nizhniy Novgorod: Vektor TiS, 2011, vol. 2. 664 p.

27. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kriukov O.V. Monitoring tekhnicheskogo sostoiianiia privodnykh elektrodvigatelei gazoperekachivaiushchikh agregatov [Technical condition monitoring of gas pumping units drive motors]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2009, no. 7, pp. 33-39.

28. Kriukov O.V., Kiiyanov N.V. Elektrooborudovanie i avtomatizatsiia vodooborotnykh sistem predpriatii s ventiliatornymi gradirniami [Electrical equipment and automation of water circulation systems of enterprises with mechanical-draft towers]. Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni R.E. Alekseeva, 2007. 260 p.

29. Kriukov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms. *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 6, pp. 1043-1048.

30. Babichev S.A., Bychkov E.V., Kriukov O.V. Analiz tekhnicheskogo sostoiianiia i bezopasnosti elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Analysis of the technical condition and safety of electrically driven gas pumping units]. *Elektrotekhnika*, 2010, no. 9, pp. 30-36.

31. Kriukov O.V., Stepanov S.E., Bychkov E.V. Invariantnye sistemy tekhnologicheskii sviazannykh elektroprivodov ob"ektov magistral'nykh gazoprovodov ob"ektov magistral'nykh gazoprovodov [Invariant systems of technologically connected electric drives of trunk gas pipelines units]. *Trudy*

VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AITA-2011. Moscow, 2011, pp. 329-350.

32. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Modernizatsiia sistem upravleniia elektroprivodnymi gazoperekachivaiushchimi agregatami v usloviakh deistvuiushchikh kompressornykh stantsii [Modernization of management systems of electrically driven gas pumping units in the conditions of the operating compressor stations]. *Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Problemy avtomatizatsii i upravleniia v tekhnicheskikh sistemakh"*. Penza, 2013. pp. 29-32.

Сведения об авторе

Крюков Олег Викторович (Нижний Новгород, Россия) – доктор технических наук, доцент, главный специалист ОТД и НТИ АО «Ги-прогазцентр» (603950, Нижний Новгород, ГСП-926, ул. Алексеевская, 26, тел./факс. (831)428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru).

About the author

Kryukov Oleg Victorovich (Nizhny Novgorod, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Associate Professor, Main Expert of Technical Documentation and STI Department JSC «Giprogazcenter» (603950, Nizhny Novgorod, 26, Alekseevskaya St., GSP-926, tel./fax.: (831)428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru).

Получено 20.02.2016