УДК 622.376.53.054.23:621.67-83

Б.Н.АБРАМОВИЧ, *д-р техн.наук, профессор, babramov@mail.ru*
Д.А.УСТИНОВ, *канд. техн. наук, доцент, bescheiden@rambler.ru*
И.Г.ПЛОТНИКОВ, *аспирант, plotnikov_igor86@mail.ru*
А.В.ТУРЫШЕВА, *аспирантка, anna_turysheva_21@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

B.N.ABRAMOVICH, *Dr. in eng. sc., professor, babramov@mail.ru*
D.A.USTINOV, *PhD in eng. sc., associate professor, bescheiden@rambler.ru*
I.G.PLOTNIKOV, *post-graduate student, plotnikov_igor86@mail.ru*
A.V.TURYSHEVA, *post-graduate student, anna_turysheva_21@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ СИНХРОННЫХ ПРИВОДОВ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассмотрено влияние различных факторов на процесс пуска высоковольтных синхронных электродвигателей. Изучены возможности оптимизации режимов пуска электромеханических комплексов с синхронными электродвигателями. Представлена математическая модель электромеханического комплекса, реализующая различные способы пуска.

***Ключевые слова*:** высоковольтный синхронный электродвигатель, способ пуска, нагрев обмоток, преобразователь частоты, система возбуждения.

STUDY START-UP OF SYNCHRONOUS DRIVES OIL AND GAS INDUSTRY

The problems of various factors on the process of launching high-voltage synchronous motors. Possibilities of optimization of start electromechanical systems with synchronous motors. A mathematical model of the electromechanical complex, which implements various starting methods.

***Key words*:** High voltage synchronous motor, method of starting, heating coils, a frequency converter, excitation system.

При эксплуатации электрооборудования нефтегазодобывающих предприятий в современных экономических условиях особое значение приобретает безостановочное производство. Восстановление производственного цикла, сложного технологического процесса и нормальных режимов работы после простоя является сложной задачей.

Наиболее энергоемкими элементами нефтегазодобывающих предприятий являются высоковольтные электродвигатели производственных механизмов, таких как насосы, вентиляторы, компрессоры с приводом от синхронного электродвигателя (СД) мощностью до 6 МВт. При пуске высоковольтных синхронных двигателей кустовых насосных станций остаточное напряжение на шинах 6 кВ достигает 70 % и менее, что недопустимо. Также становится невозможным массовый самозапуск электродвигателей после восстановления напряжения на источниках питания. Поэтому является актуальным разработка системы плавного пуска высоковольтных двигателей, при котором обеспечивается электромагнитная совместимость оборудования в соответствии с ГОСТ 13109-97 и СН 174-75.

В связи с постоянным увеличением стоимости электроэнергии экономически и технически целесообразно применение ре-

гулируемых электроприводов. Эффективным решением данной проблемы в условиях промышленных предприятий является применение систем плавного пуска, которые должны обеспечивать:

1) формирование заданных пусковых характеристик электродвигателей (плавный пуск, запуск двигателей в условиях предприятий с дефицитом мощности, реверсирование, торможение и останов);

2) гибкое управление режимами работы электродвигателей в соответствии с технологической необходимостью (оптимизация распределения нагрузок между механизмами внутри и между смежными объектами);

3) неограниченное число пусков за время эксплуатации (рациональное и экономичное использование оборудования с учетом тарифа на электроэнергию);

4) оптимизацию пусковых и тормозных моментов для безударных разгонов и остановок приводимых механизмов, увеличение срока службы подшипников, редукторов, ремней и других деталей машин;

5) защиту электрического и механического оборудования от аварийных режимов.

В зависимости от условий эксплуатации стационарных установок должны быть различные ограничения со стороны рабочего механизма и системы электроснабжения и приводного электродвигателя:

- потеря напряжения в системе электроснабжения не должна превышать допустимого значения по ГОСТ 13109-97;
- ускорение в процессе разгона механизма не должно превышать допустимого значения как для механизма, так и для самого двигателя;
- нагрев обмоток двигателя в процессе пуска не должен превышать допустимого значения;
- отклонение рабочих характеристик электроприводов, параллельно работающих стационарным установкам, не должно превышать допустимого по условиям технологического процесса;
- стоимость пускового оборудования должна быть минимально возможной.

Существуют различные способы пуска СД насосной установки: асинхронный; с помощью разгонного устройства (гонного двигателя); автотрансформаторный и реакторный; тиристорный; частотный. Процесс пуска СД можно разбить условно на два этапа. На первом этапе разгон происходит до подсинхронной частоты вращения (до скольжения $S \le 0{,}05$) в основном под действием асинхронного момента. Второй этап представляет собой процесс вхождения в синхронизм. Технические параметры пуска электромеханического комплекса с СД представлены в таблице ($I_н$ – номинальный ток СД; $P_н$ – нагрузка на муфту и вал привода).

Технические параметры пуска электродвигателя

Отрицательные факторы пуска СД большой мощности	Пуск				РУПЗ
	Прямой	Частотный	Тиристорный	Автотрансформаторный и реакторный	
Первоначальная ударная нагрузка на обмотки	$5I_н$	$(1\text{-}1{,}5)I_н$	$2{,}5\text{-}4I_н$	$(2{,}5\text{-}4)I_н$	$(1\text{-}4)I_н$
Первоначальная ударная нагрузка на муфту и вал привода	$2{,}5P_н$	$P_н$	$1{,}25P_н$	$2P_н$	$0{,}04P_н$
Длительность действия пусковых токов, с	6-8	–	14-17	7-9	4-5

Разгонное устройство плавного запуска (РУПЗ) не позволяет производить регулирование, пуск двигателя осуществляется только в холостом режиме, что в ряде случаев недопустимо. РУПЗ также создает дополнительную нагрузку на вал.

Обычно наибольший интерес при анализе первого этапа процесса пуска представляют следующие показатели:

- начальный толчок тока статора (в момент подключения двигателя к сети);
- длительность режима пуска;
- изменение токов статора и ротора в процессе разгона – для определения нагрева обмоток.

Данные величины необходимо учитывать для оценки прямого пуска (при наличии или отсутствии дополнительных сопротивлений, установок продольной емкостной компенсации в цепи статора), а также

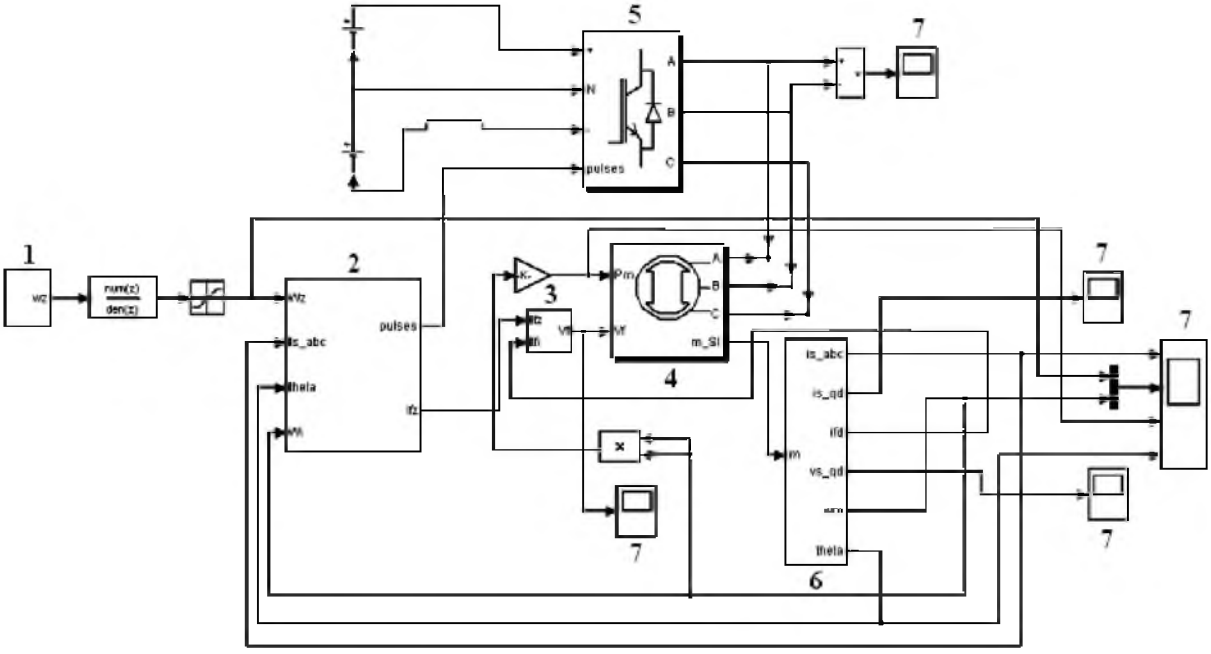


Рис.1. Математическая модель электромеханического комплекса с СД

1 – блок системы электроснабжения; 2 – блок-схема частотного регулирования; 3 – блок системы возбуждения СД; 4 – блок СД (S = 1850 кВА; $I_н$ = 178 А; $U_н$ = 6 кВ; n = 3000 мин$^{-1}$; cos φ = 0,9; КПД 96,9 %; $I_в$ = 277 А; $U_в$ = 54 В; x_d'' = 12,85 %; x_d' = 22 %; x_d = 165 %; x_2 = 15,7 %; x_0 = 4,71 %; $\tau_d'0$ = 3,05 с; τ_d' = 0,371 с; τ_d'' = 0,0454 с; τ_a = 0,0588 с); 5 – трехуровневый инвертор на IGBT-транзисторах; 6 – блок измерений; 7 – осциллограф

для выбора схемы и алгоритма включения обмотки возбуждения. Для известного типа двигателя воздействие на его асинхронную моментную характеристику может быть осуществлено изменением величины пускового сопротивления, а также емкости конденсаторных установок.

Для определения рационального способа пуска СД создана математическая модель электромеханического комплекса, реализующая различные способы пуска (прямой, регулирование входного напряжения, частотный), а также учитывающая влияние аварийных режимов в системе электроснабжения на работу СД. Блок-схема данной модели показана на рис.1.

Оценка полученных на данной модели характеристик (рис.2) показала, что при частотном пуске, а также при пуске при пониженном питающем напряжении можно ограничить величину пускового тока в пределах (1,5-3,0)$I_{ном}$.

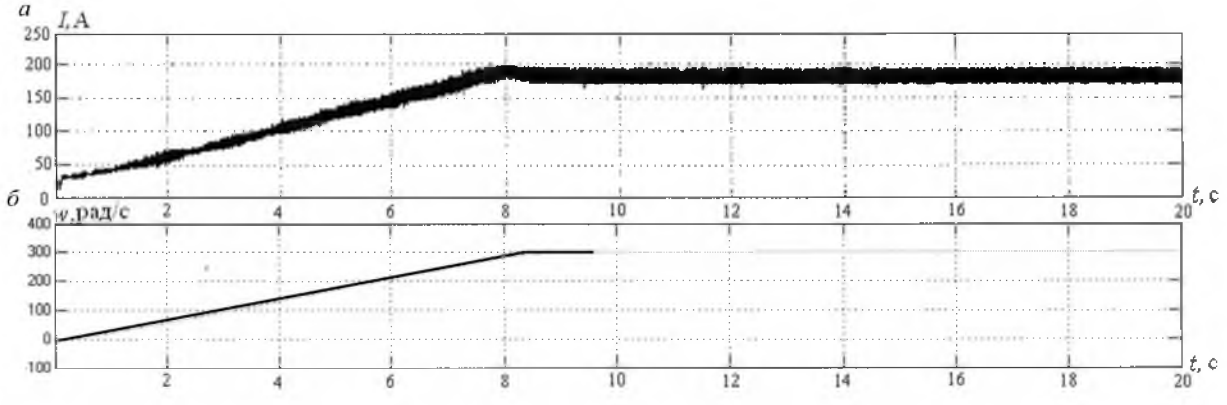


Рис.2. Осциллограммы пускового тока (*а*) и скорости вращения (*б*)

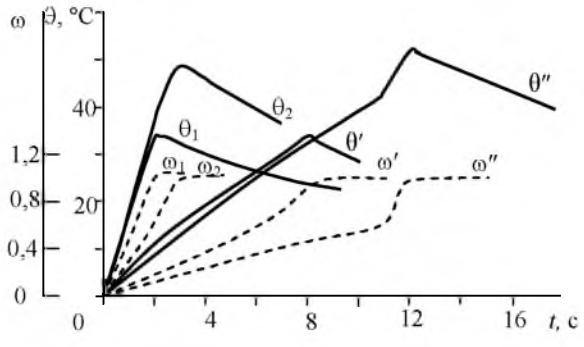


Рис.3. Изменение угловой скорости ω и температуры пусковой обмотки θ при пусках электродвигателя

θ_1,θ_2 – прямой пуск без насоса и с насосом; θ′ и θ″– реакторный пуск без насоса и с насосом. Значения индексов у кривых частот вращения аналогичны

Анализ характеристик тока статора показал, что время разгона СД зависит от функции изменения пускового тока. Чем больше площадь ограничения кривой пускового тока и осью времени, тем быстрее разгон СД до номинальной скорости. Эта площадь пропорциональна потерям электрической энергии в роторе за время пуска. Потери энергии в роторе можно уменьшить при асинхронном частотном пуске, который осуществляется при плавном увеличении частоты по мере разгона агрегата. Потери при частотном пуске вхолостую могут быть найдены следующим образом:

$$W = \int_0^t sP_a dt = \int_0^t sM_{\text{из}}\omega dt .$$

Заменяя $M_{\text{из}} = Jd\omega/dt$ и принимая скольжение S за время пуска неизменным ($S = S_1$) (такое допущение является вполне приемлемым, учитывая, что пуск происходит на устойчивой части асинхронного момента), получаем

$$W = \int_0^{\omega_0} Js_1\omega d\omega = Js_1\int_0^{\omega_0}\omega d\omega = \frac{J\omega_0^2 s_1}{2} = \frac{\tau_j P_{\text{ном}} s_1}{2} .$$

Таким образом, потери энергии в двигателе при частотном пуске будут значительно меньше потерь при пуске с постоянной частотой питающего напряжения.

При выборе способа пуска особое внимание необходимо уделять влиянию нагрева обмоток электродвигателя в процессе разгона. На рис.3 показаны изменения угловой скорости и температуры пусковой обмотки при различных условиях пуска.

Поскольку энергия, выделяемая в роторе при прямом пуске, будет меньше, чем при пуске от пониженного напряжения, то при небольшой длительности пуска нагрев обмоток получается также меньше, чем при пониженном напряжении. Однако, когда длительность пуска составляет несколько десятков секунд, значительная часть теплоты успевает рассеяться в окружающую среду, и поэтому нагрев за время пуска получится соответственно меньше, чем нагрев, подсчитанный исходя из адиабатического процесса.*

Таким образом, при выборе способа пуска высоковольтных синхронных двигателей необходимо учитывать не только ограничение пускового тока и момента, возможность формирования заданных пусковых характеристик, но также изменение температуры изоляции обмоток в период пуска.

* *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М., 1984.
Syromyatnikov I.A. Modes of operation of asynchronous and synchronous motors. Moscow, 1984.