

УДК 621.313.323

ВЫБОР СПОСОБА ПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ РЕГУЛЯТОРА

Абрамович Б.Н., Устинов Д.А.,

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург
e-mail: bescheiden@rambler.ru*

Коновалов Ю.В.,

*Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск
e-mail: yrvaskon@mail.ru*

Аннотация. Анализ данных паспортизации и координации электрических нагрузок нефтегазодобывающих предприятий показывает, что электротехнические комплексы с синхронными двигателями могут быть использованы в качестве потребителей регуляторов. Во время пуска синхронных двигателей при использовании их в качестве потребителей регуляторов наблюдаются падения напряжения питания у потребителей, обеспечивающих технологический процесс, и возникают ограничения по количеству пусков двигателей за сутки. В статье рассмотрены различные варианты пуска синхронных двигателей и предложен комбинированный, который обеспечивает минимизацию пускового тока, повышение входного момента и ограничение нагрева.

Ключевые слова: синхронный двигатель, потребитель регулятор, падение напряжения, нагрев, комбинированный пуск.

При использовании дифференцированных по зонам суток тарифов оплаты за электроэнергию ставится задача формирования рациональных графиков нагрузки, которая решается переносом электропотребления установками, выделенными в разряд потребителей регуляторов (ПР) в тарифные зоны суток с наименьшей оплатой. Это может быть достигнуто путем ограничения энергопотребления в периоды максимума нагрузок при обеспечении бесконфликтности с технологическим процессом.

На нефтегазодобывающих предприятиях (НГДП) для закачки воды в пласт на кустовых насосных станциях (КНС) и на дожимных насосных станциях (ДНС) используются насосные агрегаты, состоящие из центробежных насосов ЦНС и синхронных двигателей типов СТД, СТМ, СДБ и др., единичной мощностью от 630 до 6000 кВт. На каждой КНС может быть установлено 1 ÷ 20 агрегатов [1]. Анализ данных паспортизации и координация электрических нагрузок путем преобразования графиков электрических нагрузок в соответствии с тарифными

зонами и ограничениями потребления мощности в периоды пиковых нагрузок показал, что электротехнические комплексы, состоящие из насосных агрегатов и приводных синхронных двигателей (СД) могут быть использованы в качестве потребителей регуляторов.

Синхронные двигатели представляют собой сложное энерго и материалоёмкое электротехническое устройство. Так как на НГДП применяются СД большой установленной мощности, то использование их в качестве потребителей регуляторов приводит к возникновению следующих проблем:

1. Режим пуска мощных электротехнических комплексов с СД приводит к значительным затратам электроэнергии, что сопряжено с бросками пусковых токов (в $6 \div 8$ раз больших номинальных). Протекание повышенных токов по элементам схемы электроснабжения приводит к значительным потерям напряжения на этих элементах. При этом особенностью нефтегазодобывающих предприятий является рассредоточенность нагрузок вдоль промысловых линий электропередач на значительные расстояния. В результате этого наблюдается падение напряжения питания у потребителей, обеспечивающих технологический процесс. Так как в качестве приводных двигателей большинства добычных установок являются асинхронные двигатели, у которых полезный момент на валу пропорционален квадрату напряжения питания, то такие провалы напряжения могут нарушить основной технологический процесс добычи нефти.

2. В связи со значительным объёмом активных материалов (обмотки и магнитопроводы) в СД большой мощности, постоянная времени нагрева этих двигателей достигает нескольких часов. Поэтому при повторном пуске через время меньшее, чем время, за которое активные материалы и изоляция СД остынут до установившейся температуры окружающей среды, при больших пусковых токах будет происходить перегрев этих элементов и преждевременный выход из строя дорогостоящих электротехнических комплексов. Поэтому такие установки по условиям нагрева ограничены пуском из «горячего» состояния, как правило, один раз в сутки.

Для ограничения пускового тока может быть использован реактор, включаемый между сетью и обмоткой статора двигателя. Схема реакторного пуска двигателя показана на рис. 1. Ограничение пускового тока связано с падением напряжения на включённом в цепь статора реакторе, что приводит к значительному уменьшению асинхронного момента (ввиду квадратичной зависимости момента от напряжения).

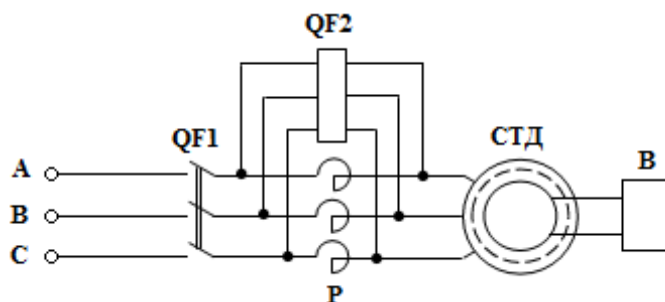


Рис. 1. Схема пуска синхронного двигателя с помощью реактора, где В – возбудитель; Р – пусковой реактор; СТД – синхронный трехфазный двигатель; QF1 – выключатель; QF2 – шунтирующий выключатель.

В качестве устройства, ограничивающего пусковой ток синхронного двигателя, может использоваться также автотрансформатор. Схема пуска двигателя с помощью автотрансформатора представлена на рис. 2. Автотрансформатор снижает напряжение на двигателе пропорционально коэффициенту трансформации, при этом потребляемый от сети ток уменьшается пропорционально квадрату коэффициента трансформации. Таким образом, применение пускового автотрансформатора позволяет значительно уменьшить потребляемый от сети ток при существенно меньшем снижении пускового момента, чем в случае реакторного пуска.

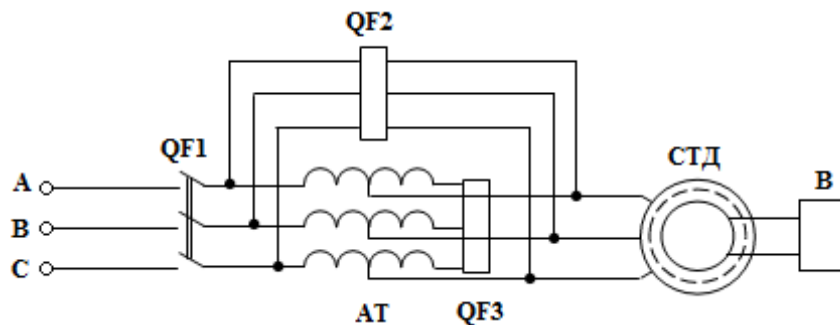


Рис. 2. Схема пуска синхронного двигателя с помощью автотрансформатора, где АТ – автотрансформатор; В – возбудитель; СТД – синхронный трехфазный двигатель; QF1 – выключатель; QF2 – шунтирующий выключатель; QF3 – выключатель, замыкающий концы обмоток в нейтральную точку.

В случае реакторного пуска для значительного уменьшения потребляемого от сети тока индуктивное сопротивление реактора должно быть соизмеримо со сверхпереходными сопротивлениями двигателя.

Пуск с поочередным включением параллельных ветвей статора можно применять в тех случаях, когда эти ветви расположены в различных пазах или когда они охватывают только некоторое число полюсов. В первом случае ограничение пускового тока при включении части параллельных ветвей происходит благодаря увеличению индуктивных сопротивлений рассеяния. Этому

сопутствует снижению пускового момента. При включении параллельной ветви, охватывающей только одну группу полюсов, происходит уменьшение тока и момента, пропорциональное числу включенных ветвей, и двигатель ведет себя, как машина меньшей мощности.

Перспективным направлением в настоящее время является пуск на пониженное напряжение через тиристорный регулятор напряжения или через, так называемые, устройства плавного пуска (Soft Start). Действительно, пуск на пониженное напряжение позволяет ограничить пусковой ток и решает первую проблему. Однако при пониженном напряжении приводной двигатель развивает меньший момент на валу, что приводит к увеличению длительности пуска и, практически, не приводит к уменьшению энергии, затрачиваемой при пуске.

Проблема уменьшения развиваемого момента при пуске снимается при использовании частотного пуска, при котором поддерживается неизменной кратность максимального момента. Время разгона СД зависит от характера 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 за время пуска. Потери энергии в роторе при частотном пуске вхолостую могут быть найдены следующим образом:

$$W = \int_0^t s P_a dt = \int_0^t s M_{uz} \omega dt, \quad (1)$$

где s – текущее скольжение, P_a – активная мощность, пропорциональная моменту на валу. Динамический, изменяющийся от частоты вращения момент M_{uz} зависит от момента инерции вращающихся масс (J) и ускорения (скорости изменения

угловой частоты вращения): $M_{uz} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$. Примем скольжение s за время

пуска неизменным ($s = s_1$), так как такое допущение является вполне приемлемым, учитывая, что пуск происходит на устойчивой части асинхронного момента, получаем:

$$W = \int_0^{\omega_0} J s_1 \omega d\omega = J s_1 \int_0^{\omega_0} \omega d\omega = \frac{J \omega_0^2 s_1}{2} = \frac{\tau_J P_{ном} s_1}{2}. \quad (2)$$

В выражении (2) величина τ_J – соответствует времени ускорения. При аналогичных расчётах потерь энергии при пуске, при котором не поддерживается постоянной кратность максимального момента, т.е. не регулируется частота на статоре, выражение для потерь имеет вид [2]:

$$W = \frac{\tau_J P_{ном}}{2}. \quad (3)$$

Сравнивая выражения потерь энергии при частотном пуске (2) и без регулирования частоты (3), видим, что потери энергии в двигателе при частотном

пуске будут значительно меньше потери энергии при пуске с постоянной частотой питающего напряжения.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что при выборе способа пуска высоковольтных синхронных двигателей необходимо учитывать не только ограничение пускового тока и момента, возможность формирования заданных пусковых характеристик, но также выделяемую тепловую энергию, приводящую к нагреванию изоляции обмоток в период пуска. На рис. 3 показаны изменения угловой частоты вращения (ω) и превышения температуры пусковой обмотки над температурой окружающей среды (θ) при различных условиях пуска [2].

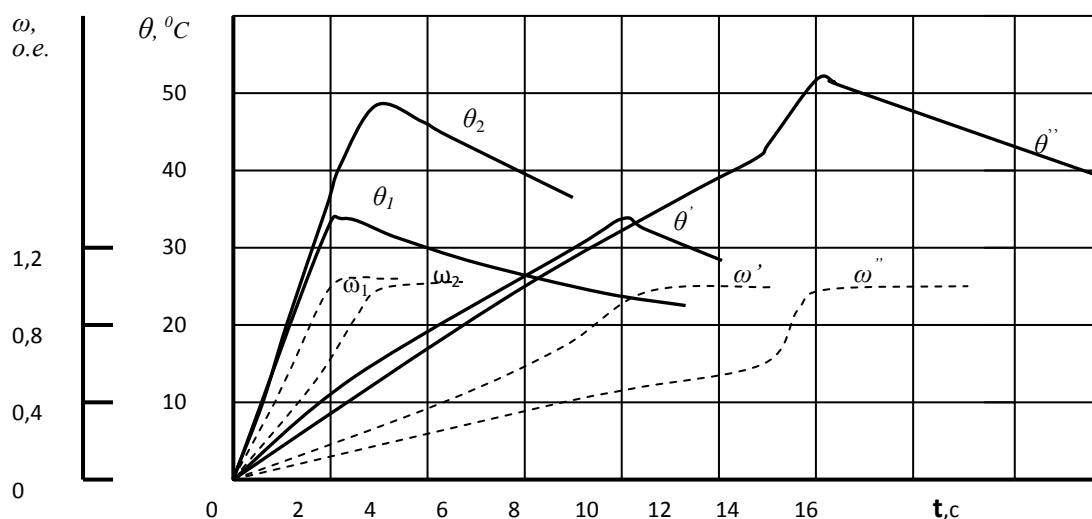


Рис. 3. Изменение угловой частоты вращения и превышения температуры пусковой обмотки над температурой окружающей среды при пусках электродвигателя: θ_1 – прямой пуск на холостом ходу; θ_2 – прямой пуск с нагрузкой; θ' – реакторный пуск на холостом ходу; θ'' – реакторный пуск с нагрузкой. У кривых частот вращения ω значения индексов принято аналогичное.

В результате исследования условий при различных способах пуска с целью повышения надежности и сохранения ресурса синхронных двигателей, предлагается комбинированный способ пуска электротехнического комплекса с СД [4, 5]. Для его реализации в цепь статора вводится преобразователь частоты (ПЧ), а в систему возбуждения вводится преобразователь с двухсторонней проводимостью (ПДП), при этом может быть использована мостовая или нулевая схемы ПДП. Максимальный момент электромеханического комплекса с СД, в области малых скольжений, может быть достигнут путем управления выходным напряжением ПДП, при котором обеспечивается режим, эквивалентный введению в цепь обмотки возбуждения регулируемого активно-емкостного сопротивления.

Алгоритм управления режимом напряжения и возбуждением при таком пуске, ресинхронизации и синхронном режиме электромеханического комплекса с СД представлен на рис. 4.

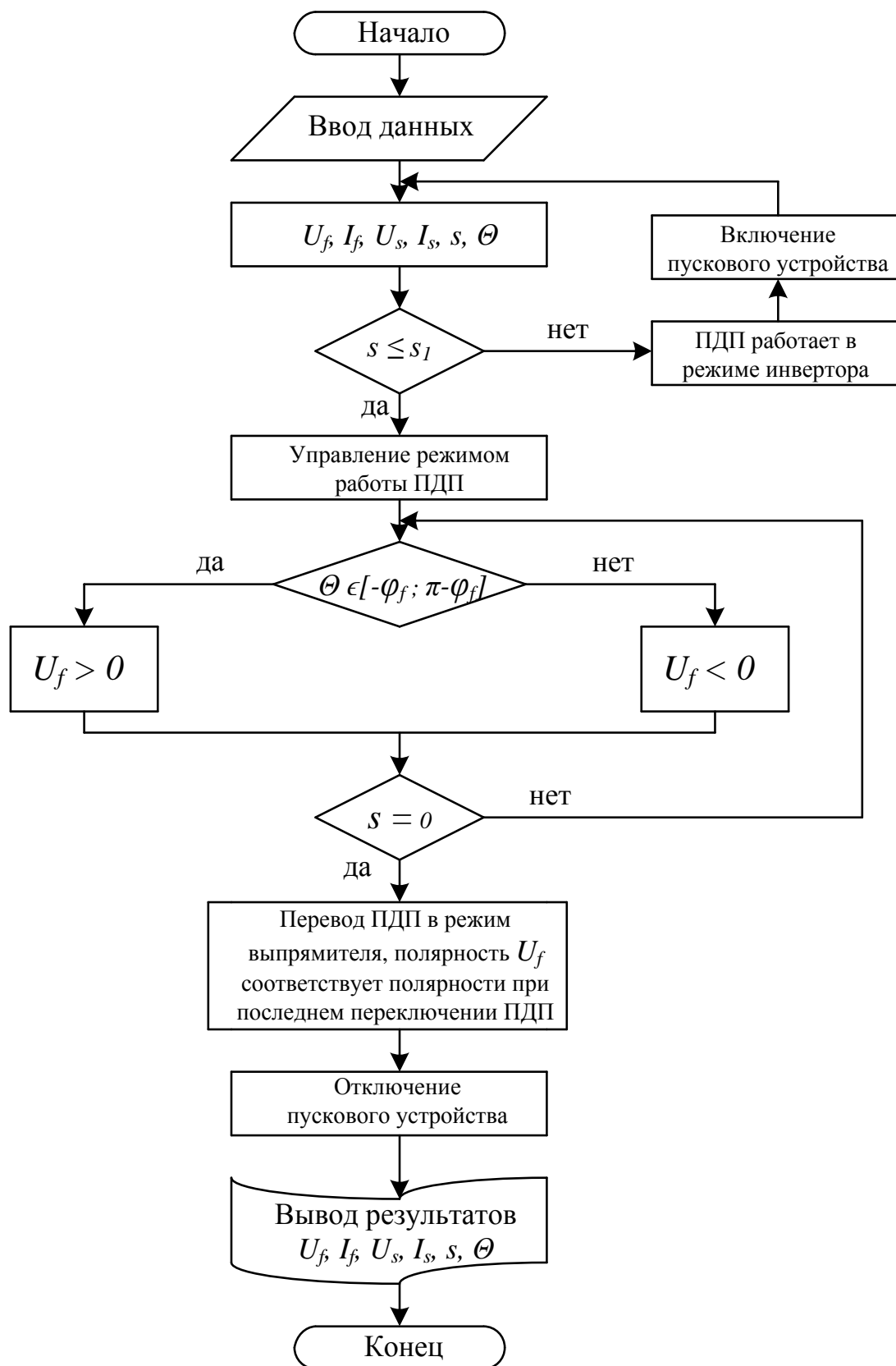


Рис. 4. Алгоритм управления режимом напряжения и возбуждением при пуске, ресинхронизации и синхронном режиме электромеханического комплекса с СД.

Данный алгоритм включает в себя следующие этапы:

- ввод параметров сети и СД: U_s , I_s – напряжение и ток сети; U_f , I_f – напряжение и ток возбуждения; s – скольжение СД; Θ – угол нагрузки; φ_f – угол между первой гармонической составляющей выходного напряжения ПДП U_f и ЭДС, наведённой электромагнитным полем статора в обмотке возбуждения. Если скольжение двигателя s больше заданного значения скольжения s_l , при достижении которого осуществляем подачу возбуждения, разгон двигателя осуществляется с помощью пускового устройства. В качестве пускового устройства может быть использованы, например, реактор, автотрансформатор, иные ограничители пускового тока и т.д. При этом ПДП работает в инверторном режиме для обеих полуолн наведенного тока;
- при достижении скольжением заданного значения s_l осуществляем регулирование полярности выходного напряжения ПДП в функции угла нагрузки и переходной постоянной времени СД T'_d ;
- при достижении синхронной скорости переводим ПДП в выпрямительный режим, полярность напряжения возбуждения соответствует полярности при последнем переключении ПДП и отключаем пусковое устройство.

В процессе пуска электромеханического комплекса с СД производится непрерывный контроль над изменением параметров сети и двигателя [3].

Осциллограммы изменения тока и напряжения возбуждения в режиме обеспечения максимального повышения входного момента СД показаны на рис. 5, где обозначения I и B соответствуют интервалам времени работы ПДП в режиме инвертора и выпрямителя соответственно. При анализе полученных осциллограмм видно, что с уменьшением скольжения увеличивается продолжительность работы ПДП в режиме выпрямителя.

Использование частотного способа пуска совместно с ПДП в цепи обмотки возбуждения при вентиляторной нагрузке на валу, дает возможность осуществления частотного разгона до величины скольжения $0,15 \div 0,1$. После этого, согласно алгоритму, продолжаем асинхронный разгон СД до подсинхронной скорости при работе ПДП в инверторном режиме. Управление выходным напряжением ПДП в инверторном режиме эквивалентно введению в цепь обмотки возбуждения активного сопротивления. Разгон до скольжения $0,15 \div 0,1$ при вентиляторной нагрузке на валу дает возможность применения преобразователя частоты меньшей мощности.

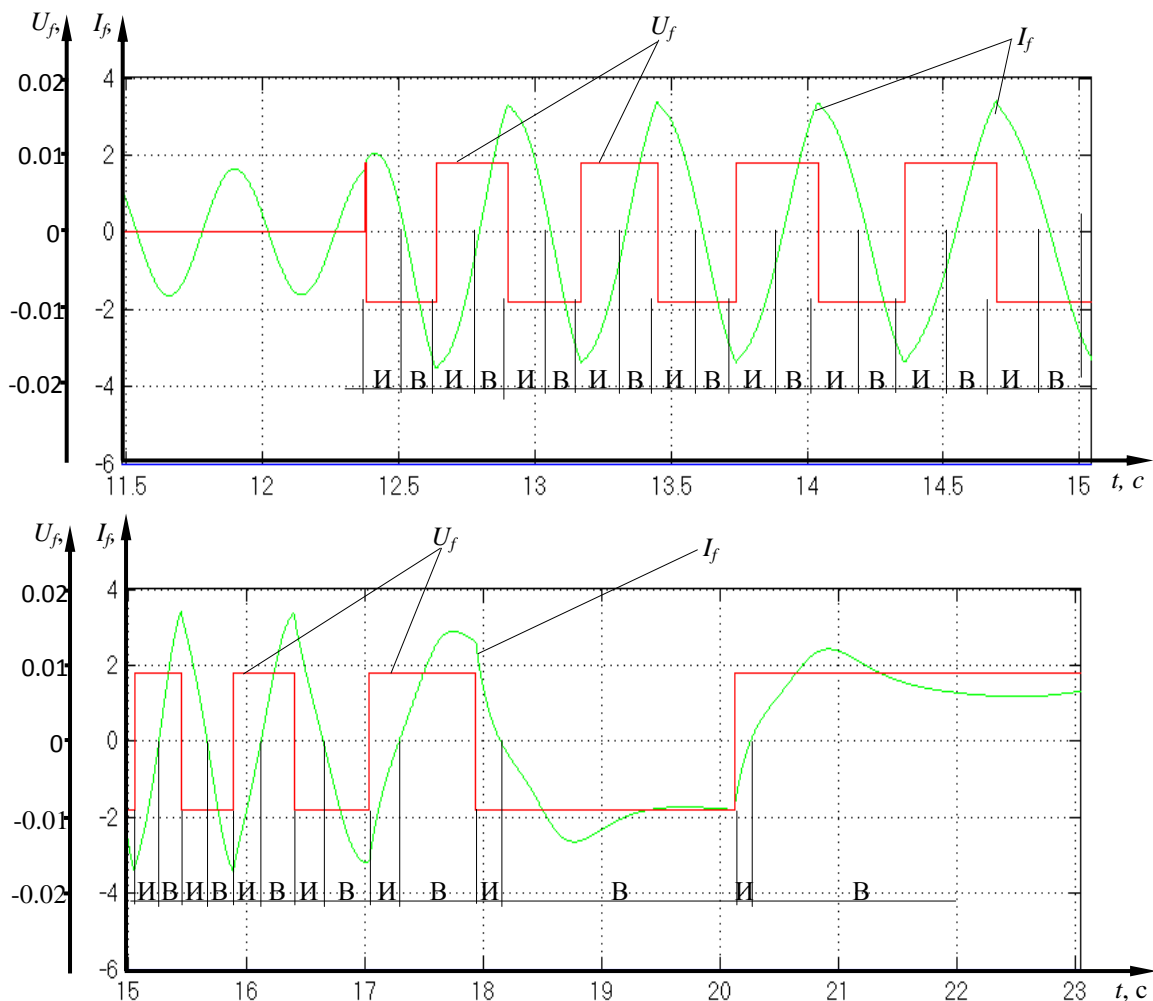


Рис. 5. Осциллограммы изменения тока возбуждения I_f и выходного напряжения преобразователя с двухсторонней проводимостью U_f в различные моменты времени при рациональном регулировании выходного напряжения ПДП для СДН - 15-21-16.

Выводы

Комбинированный способ пуска электротехнического комплекса с СД обеспечивает минимизацию пускового тока, повышение входного момента синхронной машины и ограничение нагрева синхронного двигателя. Это позволяет использовать СД в качестве потребителя-регулятора, выполняя пуск два раза в сутки из менее нагретого, а не из «горячего» состояния. При этом ПЧ целесообразно использовать для поочередного пуска нескольких СД.

Литература

1. Абрамович Б.Н., Круглый А.А., Устинов Д.А. Электромеханические комплексы с синхронными двигателями. Возбуждение, регулирование, устойчивость // Palmarium Academic Publishing. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG., 2012. 370 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
3. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А. Исследование повышения входного момента электромеханических комплексов с синхронными двигателями. // Горное оборудование и электромеханика. 2007. №4. С. 29 – 31.
4. Устинов Д.А., Татаренков Е.В. Управление синхронными приводами стационарных установок в процессе пуска. // Записки Горного института. СПб. 2002, Т. 150, Ч 1. РИЦ СПГИ (ТУ). С. 103 – 106.
5. Способ управления возбуждением синхронной машины/ Абрамович Б.Н.и др. Патент на изобретение № 2242080. Приоритет изобретения 28 ноября 2002 г.

SELECTION OF STARTING SYNCHRONOUS MOTOR USED AS CONSUMER REGULATOR

B. N. Abramovich, D. A. Ustinov

*National University of mineral resources "Mountain", St. Petersburg
bescheiden@rambler.ru*

Yu. V. Konovalov

*Irkutsk State Technical University
yrvaskon@mail.ru*

Abstract. *Data analysis and coordination of certification of electrical loads oil and gas companies shows that electrical systems with synchronous motors can be used as a consumer regulators. During starting of synchronous motors using them as a consumer regulators have been falling supply voltage for consumers, providing process, and there are limits on the number of motor starts per day. The article describes the various options for starting synchronous motors and proposed combination, which minimizes inrush current, increase the input torque and limit heating.*

Keywords: *synchronous motor, the consumer regulator, voltage drop, heating, combined start.*

References

1. Abramovich B.N., Kruglyi A.A. , Ustinov D.A. Elektromechanicheskie komplekсы s sinhronnymi dvigateleyami. Vozbuzhdenie, regulirovanie, ustoichivost' // Palmarium Academic Publishing. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG., 2012. 370 s.
2. Syromyatnikov I.A. Rezhimy raboty asinhronnyh i sinhronnyh dvigatelei M.: Energoatomizdat, 1984. 240 s.
3. Abramovich B.N., Ustinov D.A. Issledovanie povysheniya vhodnogo momenta elektromechanicheskikh kompleksov s sinhronnymi dvigateleyami. // Gornoe oborudovanie i elektromehanika. 2007. ¹4. S. 29 - 31.
4. Ustinov D.A., Tatarenkov E.V. Upravlenie sinhronnymi privodami stacionarnyyh ustanovok v processe puska. // Zapiski Gornogo instituta. SPb. 2002, T. 150, Ch 1. RIC SPGGI (TU). S. 103 - 106.
5. Sposob upravleniya vozbuzhdeniem sinhronnoi mashiny/ Abramovich B.N.i dr. Patent na izobretenie ¹ 2242080. Prioritet izobreteniya 28 noyabrya 2002 g.