

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЧ-АД

Л.В. Куликова, А.Л. Андронов (*г. Барнаул, Россия*)

Одной из наиболее перспективных областей внедрения регулируемого асинхронного электропривода являются насосные установки систем водоснабжения. Как правило, насосные агрегаты работают с постоянной частотой вращения, а давление воды регулируется задвижкой либо вообще не регулируется. Такой режим связан с неоправданно большим расходом электроэнергии и повышенным давлением в гидравлической сети. Хорошо известно, что регулирование частоты вращения рабочего колеса насоса позволяет создать принципиально новую технологию транспорта воды. В этом случае при поддержании в системе минимально необходимого постоянного давления достигается экономия электроэнергии до 50%. Регулирование давления приводит также к существенному уменьшению расхода воды (до 25%), так как в гидравлических сетях велика доля непроизводительных утечек. Дополнительным эффектом является снижение аварийности трубопроводов.

Наибольший экономический эффект в насосных установках дает применение частотно-регулируемого электропривода. Здесь можно использовать сравнительно простые преобразователи частоты, так как к таким системам предъявляются относительно невысокие технологические требования: диапазон регулирования скорости до 1:10, возможность плавного пуска двигателя с заданным темпом, наличие регулятора давления, защитные функции. Такие требования обуславливают возможность применения разомкнутого ("скалярного") принципа управления.

Для проверки эффективности использования преобразователей подобного типа был проведен математический эксперимент, где моделировались различные режимы работы системы преобразователь частоты-асинхронный двигатель (ПЧ-АД). Полученные результаты полностью подтвердили выводы, представленные в целом ряде публикаций [1-4], т.е. эффективность применения простых преобразователей частоты. Фактическая экономия электроэнергии составляет не менее 40%, а экономия воды — не менее 25%. При такой экономии ресурсов преобразователь окупается за 6-8 мес.

Очевидно, что потребность в использовании регулируемого электропривода на на-

сосных станциях достаточно велика. Отсюда возникает необходимость разработки алгоритмов системы управления ПЧ-АД.

Система ПЧ-АД с точки зрения моделирования представляет довольно сложную систему и поэтому наиболее целесообразно проводить ее исследование с помощью математической модели.

В настоящее время при разработке программного обеспечения обычно используют одну из двух технологий: структурное программирование или объектно-ориентированное программирование [5].

Первая технология для разработки сложных программ рекомендует разбивать (декомпозировать) программу на подпрограммы (процедуры).

В основе второй технологии лежит объектная декомпозиция, при которой в предметной области задачи выделяют отдельно функционирующие элементы. Поведение этих объектов программно моделируется с использованием специальных средств, а затем, уже из готовых объектов, опять же специальным способом, выполняется предусмотренная программа.

Блок-схема модели системы ПЧ-АД (рисунк 1), разработанная в соответствии с принципом объектной декомпозиции, содержит следующие блоки: силовая часть ПЧ, система управления ПЧ, АД, блок питания, модель нагрузки.

Ориентируясь на принцип объектной декомпозиции, для реализации компьютерной модели системы ПЧ-АД наиболее целесообразно использовать одну из современных систем программирования — систему Matlab 6.0, являющуюся языком высокого уровня, предназначенным для вычислений с большим числом прикладных программ [5].

Среди пакетов расширения необходимо особо отметить пакет Simulink 4.0 [6], предназначенный для моделирования динамических систем, модели которых состоят из отдельных блоков (компонентов). Именно объектная технология лежит в основе используемых Simulink библиотек стандартных компонентов.

При математическом моделировании трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором примем следующие допущения:

- не учитываются потери в стали;
- рабочее поле машины считается плоскопараллельным;
- учитываются только первые пространственные гармоники МДС обмоток и магнитной индукции главного магнитного поля вдоль полюсного деления;
- не учитываются насыщение путей рассеяния и взаимное влияние потоков рассеяния и главного магнитного потока.

Для построения модели насыщенной асинхронной машины с короткозамкнутой обмоткой ротора во вращающейся системе координат и питанием обмоток от автономных источников можно использовать следующие уравнения [7]:

$$U_s = A_s U_s^{Fs}$$

$$U_s = p\Psi_s + \omega_k B\Psi_s + R_s I_s ;$$

$$0 = p\Psi_r + \omega_k B\Psi_r + R_r I_r$$

$$\Psi_s = \Psi_m + \Psi_{s\sigma}$$

$$\Psi_r = \Psi_m + \Psi_{r\sigma} ;$$

$$\Psi_m = F_m I_m$$

$$I_m = C(I_s + I_r)$$

$$\beta = p(\theta_k - \theta) ;$$

$$I_s^{Fs} = A_s^{-1} I_s$$

$$m = \Psi_m B I_r = \Psi_{my} i_{rx} - \Psi_{mx} i_{ry}$$

$$p\omega = J^{-1}(m - m_c) ;$$

$$p\theta = \omega_1$$

где J и m_c – приведенные к валу двигателя относительные значения момента инерции механической системы и момента статического сопротивления.

На рисунке 2 представлена структурная схема модели, соответствующая приведенным уравнениям и представляющая собой совокупность связанных определенных образом многомерных и одномерных звеньев направленного действия. На входе модели машины включен блок преобразования вектора фазных напряжений U_s^{Fs} в вектор U_s с помощью матрицы прямого преобразования $A_s(\theta_k)$.

Для определения реакции машины как элемента нагрузки источника питания в модели предусмотрено вычисление вектора

фазных токов статора I_s^{Fs} с помощью матрицы обратного преобразования $A_s^{-1}(\theta_k)$. Параметр преобразования θ_k может быть произвольной функцией времени либо переменных состояния моделируемого объекта.

Модель (рисунок 2) дает полную картину взаимосвязи между переменными состояния объекта.

Характеристика намагничивания АД является нелинейной, поэтому для построения модели, более точно отражающей свойства АД, необходимо учесть эту нелинейность при разработке модели АД.

На основе структурной схемы АД (рисунок 2) была разработана компьютерная модель АД с учетом насыщения стали в приложении Simulink 4.0 среды Matlab 6.0 [5, 6].

Модель позволяет наблюдать временные зависимости токов, потокосцеплений статора и ротора, а также скорость ротора двигателя.

В качестве примера работы разработанной модели на рисунке 3 приведены временные зависимости (в о.е.) скорости ω , момента M , тока I_{sa} и потокосцепления fluxs фазы А статора, тока I_{ra} и потокосцепления fluxr фазы А ротора, полученные при моделировании прямого пуска АД типа АИР80А2У3 мощностью 1,5 кВт.

Рассмотрим общие принципы построения микропроцессорной системы управления таким электроприводом.

Силовая часть разрабатываемой системы; имеет классическую структуру, т.е. состоит из неуправляемого выпрямителя, фильтра звена постоянного тока и инвертора с транзисторами типа IGBT. Для обеспечения защитных функций в звене постоянного тока устанавливаются датчики тока и напряжения. Кроме того, для защиты от перегрева транзисторов используется датчик температуры. В выходную магистраль насосной установки помещается датчик давления воды, необходимый для обеспечения автоматического режима работы электропривода.

На микропроцессорную систему управления возлагаются следующие функции:

— выдача управляющих сигналов на драйверы транзисторов, т.е. обеспечение широтно-импульсной модуляции в соответствии с требуемыми значениями напряжения и частоты на выходе инвертора;

— работа в ручном режиме (задание частоты питающего напряжения непосредственно с пульта управления);

— работа в автоматическом режиме (поддержание заданного давления с использованием ПИ-регулятора);

— выдача на пульт управления информации о состоянии привода и текущих значениях частоты, давления, напряжения, тока и др.;

— возможность задания параметров работы привода с пульта управления, которые сохраняются в энергонезависимом ОЗУ;

— плавный пуск двигателя с заданным темпом в режиме ручного управления;

— возможность самозапуска двигателя при подаче питающего напряжения, а так же после его временного исчезновения и последующего восстановления;

— прием сигналов с датчиков тока, напряжения, давления и температуры;

— отключение двигателя при недопустимом снижении или повышении сетевого напряжения, при перегрузке по току, при недопустимом снижении давления, при перегреве и аварии транзисторов, при сбоях в системе управления;

— выдача управляющего сигнала на включение неуправляемого двигателя резервного насоса в случае неисправности.

Общая структура программы показана на рисунке 4. В ней выделены следующие части:

- основная часть программы;
- подпрограмма управления;
- подпрограмма аналого-цифрового преобразования.

Подпрограмма управления является ключевой. В ней производится расчет частоты и амплитуды выходного напряжения и времени включения транзисторов. Это наи-

более критическая по времени выполнения часть, требующая максимально возможной оптимизации по быстродействию. Подпрограмма управления вызывается с периодом ШИМ. Генерация периодических прерываний обеспечивается модулем высокоскоростного ввода/вывода. В данной системе управления применен так называемый пространственно-векторный принцип модуляции, т.е. на каждом шаге рассчитываются текущее требуемое положение и значение вектора напряжения статора, который реализуется как векторная сумма двух из шести возможных ненулевых векторов инвертора, включаемых на определенные интервалы времени. Базовые расчетные формулы для временных интервалов приведены в [7].

Текущее угловое положение вектора напряжения статора рассчитывается следующим образом:

$$\varphi = \varphi' + T_k 2 \pi f,$$

где φ — угол вектора напряжения; φ' — угол вектора напряжения на предыдущем шаге расчета; T_k — период модуляции; f — текущее значение частоты выходного напряжения.

Значение вектора напряжения определяется текущим значением частоты. По рассчитанному вектору напряжения определяется время включения транзисторов. Команды на переключение загружаются в буфер модуля высокоскоростного ввода/вывода и выполняются в заданные моменты времени без каких-либо программных инструкций с минимальным использованием ресурсов процессора.

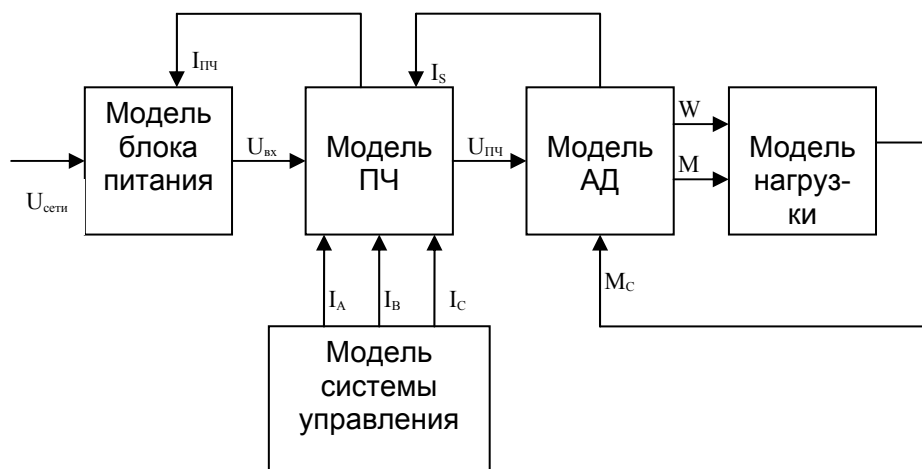


Рисунок 1 – Блок-схема модели системы ПЧ-АД

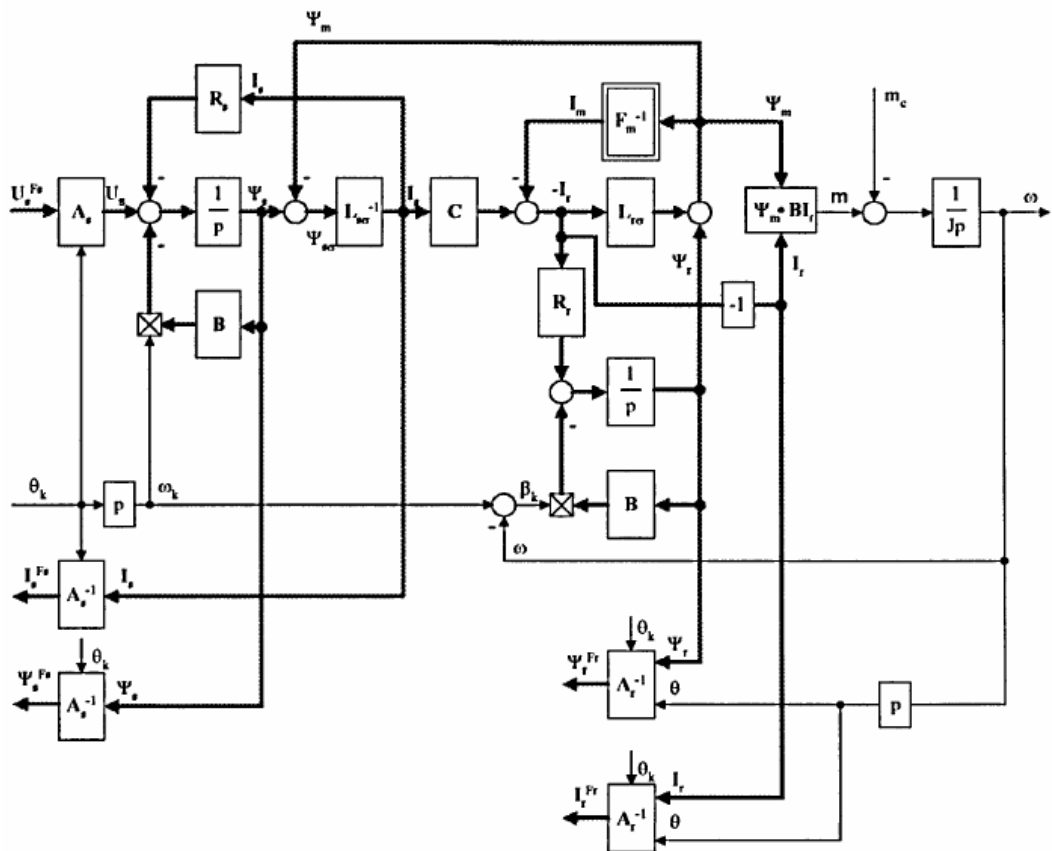


Рисунок 2 – Структурная схема модели системы ПЧ-АД

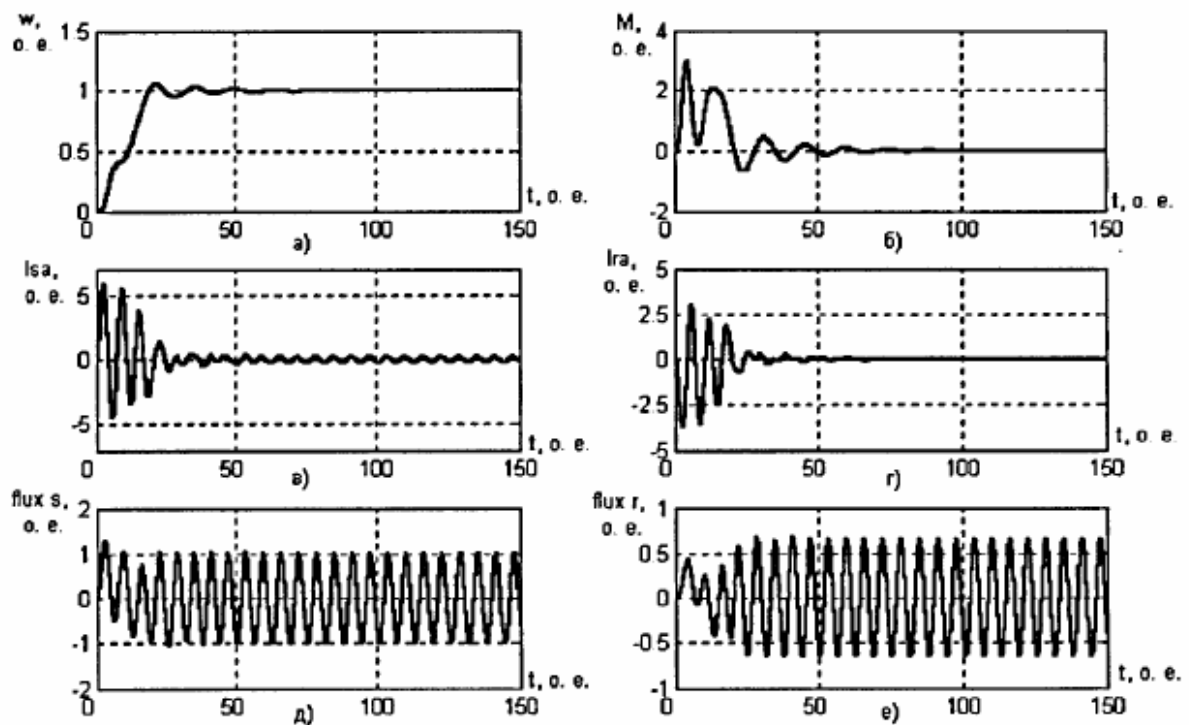


Рисунок 3 – Результаты моделирования прямого пуска АД типа АИР80А2УЗ мощностью 1,5 кВт

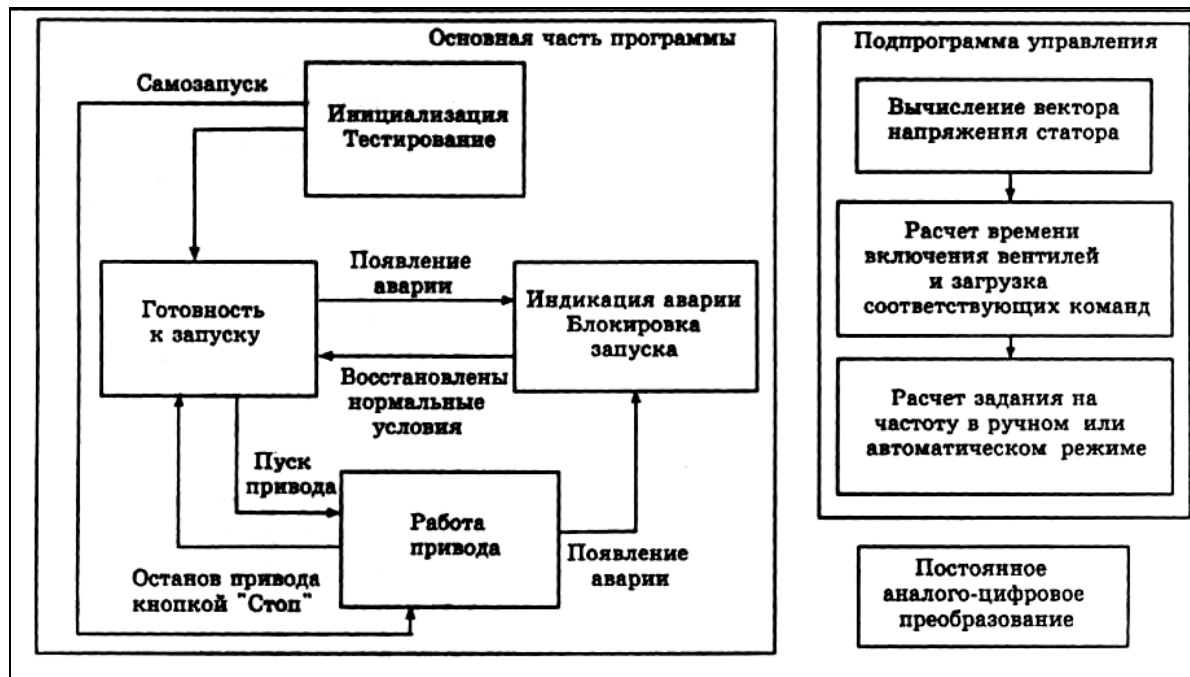


Рисунок 4 – Общая структура программы управления системы ПЧ-АД

Подпрограмма управления также рассчитывает текущее значение частоты выходного напряжения по следующим формулам:

$$f = k t$$

– разгон привода в ручном режиме;

$$f = f^*$$

– работа на заданной с пульта частоте;

$$f = f' + (k_u T_k + k_n) \Delta P - k_n \Delta P'$$

– работа в автоматическом режиме, где k – коэффициент, соответствующий темпу разгона; t – время, отсчитываемое от момента запуска двигателя; f^* – рабочая частота, заданная пользователем в ручном режиме, в автоматическом режиме задание на частоту определяется по алгоритму работы ПИ-регулятора; ΔP – разность заданного и действительного давления; f' – задание на частоту, рассчитанное в предыдущем шаге; $\Delta P'$ – ошибка по давлению на предыдущем шаге; k_n и k_u соответственно пропорциональный и интегральный коэффициенты ПИ-регулятора.

Постоянное аналого-цифровое преобразование сигналов с датчиков идет параллельно с выполнением программы. После завершения преобразования по текущему каналу происходят нормализация результата (если требуется), его передача в соответствующую переменную и начинается преобразование по следующему каналу.

Все остальные функции берет на себя основная часть программы, которая выполняется в свободное от работы подпрограмм обработки прерываний время (в фоновом режиме). Основная часть работает в следующей последовательности. При включении питания происходят инициализация и начальное тестирование системы. После тестирования и заряда конденсаторной батареи фильтра звена постоянного тока привод переходит в состояние готовности к запуску или непосредственно к работе, если включен режим самозапуска. При обнаружении аварии во время работы или в режиме готовности привод переходит в режим блокировки запуска. При этом пользователь может работать с пультом управления, но не может запустить двигатель.

Для изучения особенностей работы асинхронного электропривода на насосной установке было проведено компьютерное моделирование работы насосного агрегата, включающего модели асинхронного двигателя, преобразователя частоты, насоса и гидравлической сети. Моделирование позволяет сделать следующие выводы.

1. Применение плавного пуска существенно снижает динамические нагрузки на двигатель и гидравлическую сеть по сравнению с нерегулируемым электроприводом.

На рисунке 5 показаны пусковые динамические характеристики двигателя при пря-

мом пуске от сети и плавном пуске от преобразователя. Прямой пуск связан с большими колебаниями тока и момента двигателя. В частности, пусковой ток достигает шести кратного значения по отношению к номиналу. Преимущества плавного пуска очевидны: существенно уменьшаются броски тока и момента при том же времени переходного процесса.

На рисунке 6 показаны переходные процессы при работе в автоматическом режиме, на рисунке 6,а – плавный пуск, обеспечиваемый ПИ-регулятором, а на рисунке 6,б – реакция на ступенчатое 40% -е падение входного давления (P_2 – давление на выходе насоса).

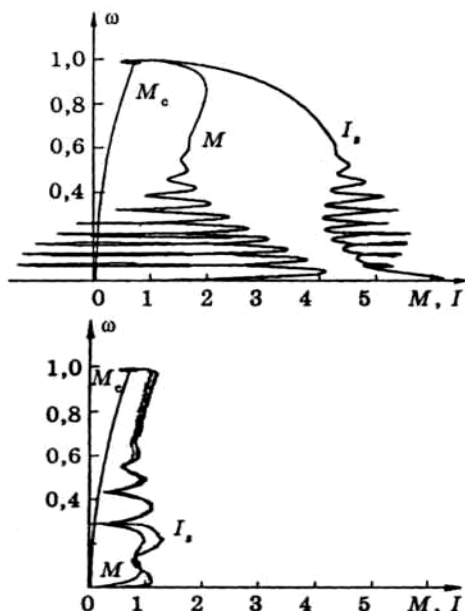


Рисунок 5 – Пусковые динамические характеристики двигателя

Очевидно, что процесс поддержания заданного давления происходит без существенных бросков тока и момента. Причем в данном случае быстроедействие системы является избыточным. Уменьшив коэффициенты регулятора, можно получить практически плавное изменение тока и момента. Настройка коэффициентов ПИ-регулятора не требует точных расчетов и может быть легко подобрана вручную. Пропорциональную составляющую регулятора можно отключить.

2. Падение напряжения на активных сопротивлениях статора, которое приводит к уменьшению момента двигателя на малых скоростях, не влияет на работу системы, так как при малых скоростях двигатель работает практически в режиме холостого хода.

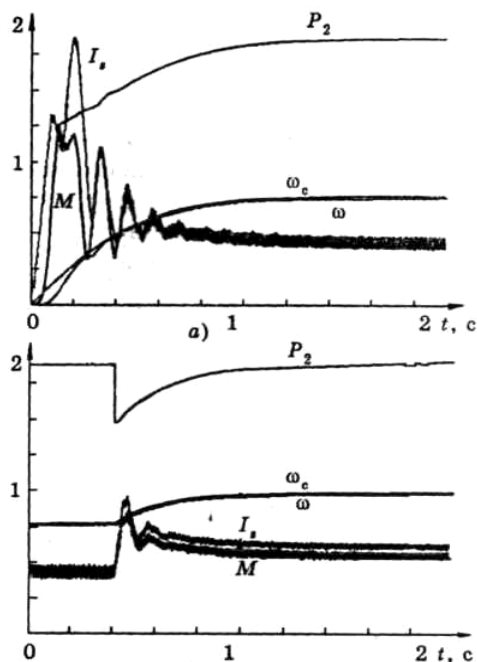


Рисунок 6 – Результаты моделирования переходных процессов при работе в автоматическом режиме

В целом же моделирование работы в различных режимах показало, что простые принципы управления, реализованные в рассматриваемой системе, достаточно эффективны для применения в насосных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы НПК «Межрегиональная научно-практическая конференция по применению энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода во всех отраслях производства и в коммунальном хозяйстве». – Новоуральск. 22-25 января 2002. – Екатеринбург: Сократ, 2002. – 267 с.
2. Сарач Б.М. Энергосберегающая насосная станция (опыт практической реализации) // Вестник МЭИ. – 1995. – № 1. – С. 82-87.
3. Сарач Б.М., Бастунский А.М. Заводские и натурные испытания насосных агрегатов с преобразователями частоты // Электротехника. – 1995. – №7. – С. 19-20.
4. Сарач Б.М., Хромых И.Е. Опыт внедрения энергосберегающих насосных станций // Промышленная энергетика. – 1997. – № 8. – С. 22-25.
5. Дьяконов В. Matlab 6: учебный курс – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
6. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
7. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.