

УДК 62.83.52

А. В. ЧЕРМАЛЫХ, канд. техн. наук, НТУУ «КПИ», Киев;
В. М. ЧЕРМАЛЫХ, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПИ», Киев;
И. Я. МАЙДАНСКИЙ, инж., НТУУ «КПИ», Киев

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИЕЙ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

На основе анализа режимов работы теплового насоса рассмотрены возможные структуры систем управления электроприводом компрессоров теплонасосной установки. С помощью структурных моделей получены графики изменения контролируемых переменных. По результатам моделирования даны рекомендации относительно рациональности применения систем управления компрессорной станцией в зависимости от оценочных критериев и технологического режима работы теплового насоса. Из.: 3. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: насос, электропривод, компрессор, моделирование.

Введение

В настоящее время наиболее актуальной проблемой в теплоснабжении объектов жилищно-коммунального хозяйства является поиск и внедрение новых эффективных энергосберегающих технологий для получения тепла и использования нетрадиционных источников энергии.

В этой связи, одним из эффективных энергосберегающих способов экономии привычного органического топлива (газа, угля), снижения загрязнения окружающей среды и удовлетворения потребностей потребителей в технологическом тепле можно считать применение теплонасосных технологий производства теплоты.

Тепловой насос представляет собой специализированную установку, которая преобразует низкопотенциальную энергию природных источников теплоты и низкотемпературных энергетических ресурсов (грунт, вода, воздух) в энергию более высокого потенциала, которая пригодна для практического использования [1].

Цель работы

Исследования различных систем автоматизированного управления компрессорными установками теплового насоса с помощью структурных моделей, обоснование и выдача рекомендаций о рациональности их применения относительно основных оценочных критериев функционирования теплонасосной станции.

Актуальность темы исследований

На сегодняшний день, с возрастанием спроса на использование альтернативных источников энергии происходит активное внедрение тепловых насосов. Мировые производители стремительно разрабатывают новые схемы практического применения теплонасосного оборудования. При этом пути совершенствования тепловых насосов в большинстве случаев ограничиваются

применением новых типов хладагента, методов отбора тепла низкого потенциала, температурных режимов работы и т.п. [2].

В литературных источниках, которые касаются вопросов использования теплонасосных технологий, практически полностью отсутствуют сведения о методах

© А. В. ЧЕРМАЛЫХ, В. М. ЧЕРМАЛЫХ, И. Я. МАЙДАНСКИЙ, 2012

решения проблемы управления режимом работы теплового насоса со стороны электропривода. При этом, компрессорная станция является одной из основных составных частей теплового насоса, оптимальная работа которой напрямую зависит от системы управления электроприводом компрессора. В свою очередь экономические показатели теплонасосной установки в целом, в значительной степени зависят именно от режима функционирования компрессорной станции.

В этой связи тему работы, связанную с анализом и выбором рациональных систем управления электроприводом компрессорной станцией теплового насоса следует считать актуальной.

Материалы исследований

Тенденцией последнего времени при эксплуатации тепловых насосов является использование одного из двух режимов: регулирование температуры на выходе установки в заданных пределах или поддержание температуры на требуемом уровне. Кроме того, для тепловых насосов характерным является применение многокомпрессорных станций с индивидуальным электроприводом для каждого компрессора. Рассмотрим наиболее распространенный вариант двухкомпрессорной станции с двумя приводными электродвигателями. Такое решение связано с тем, что даже в случае выхода из строя одной компрессорной установки, вторая продолжает работать, обеспечивая половинную мощность теплового насоса относительно расчетной.

Для решения задачи контроля температуры в необходимом диапазоне (55...65°C) многие фирмы-производители тепловых насосов предлагают вариант компрессорной станции с двумя нерегулируемыми асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями (обозначим их соответственно $M1$ и $M2$). Алгоритм работы такого привода следующий.

Вкл. $M1 \rightarrow t^{\circ} \approx 35^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Вкл. $M2 \rightarrow t^{\circ} \approx 65^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Откл. $M1 \rightarrow t^{\circ} \approx 55^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Вкл. $M1 \rightarrow t^{\circ} \approx 65^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Откл. $M2 \rightarrow t^{\circ} \approx 55^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Вкл. $M2 \rightarrow t^{\circ} \approx 65^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Откл. $M1 \rightarrow t^{\circ} \approx 55^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Вкл. $M1 \rightarrow$ и т.д.

Таким образом, имеет место регулирование температуры в заданных границах за счет отключения/включения одного из двигателей. Команда на отключение двигателя подается при возрастании температуры до верхней границы, а команда на его включение поступает после снижения температуры до нижней границы. В этом случае реализуется релейный закон регулирования. Выравнивание теплового режима в двигателях обеспечивается поочередной их работой, а значительная инерционность теплового насоса по каналу изменения температуры относительно кривой охлаждения двигателей обеспечивает их естественное охлаждения за время, когда один из двигателей отключен от сети.

Рассматриваемый способ автоматизированного управления компрессорной станции обладает как рядом очевидных преимуществ, так и существенных недостатков.

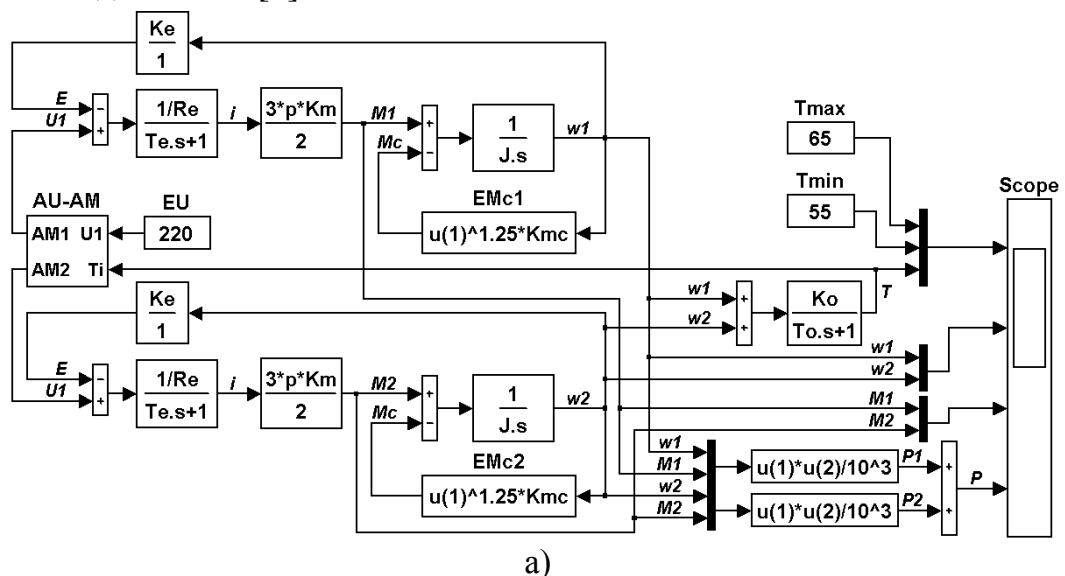
Основными достоинствами являются простота технической реализации, низкие массогабаритные и стоимостные показатели, поскольку необходимый алгоритм работы обеспечивается за счет применения достаточно простых устройств автоматики при полном отсутствии силовых полупроводниковых преобразователей.

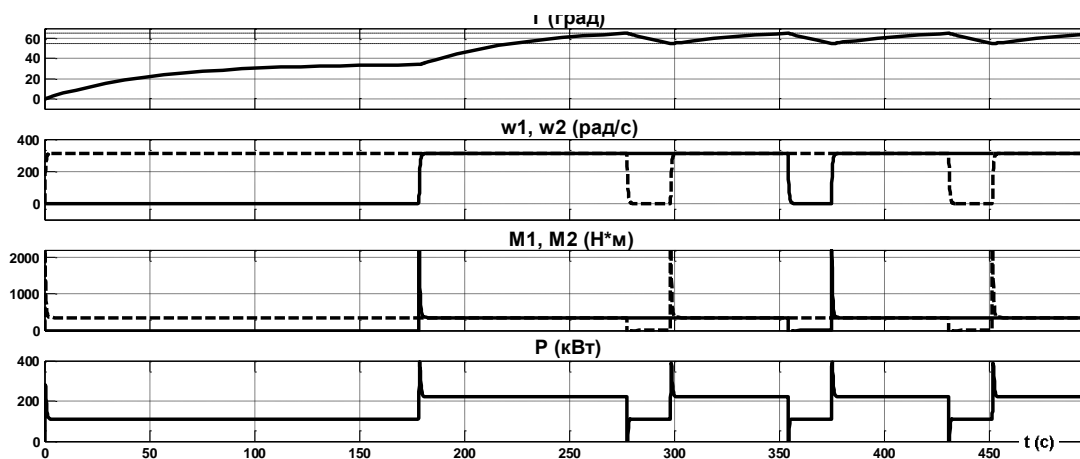
Главный недостаток связан с постоянным протеканием в системе электропривода переходных процессов запуска и отключения двигателей.

Возникающие при этом проблемы рассмотрим с помощью структуры двухдвигательной компрессорной станции теплового насоса с нерегулируемым электроприводом на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором типа 4АМУ280S2 со следующими паспортными данными: номинальная мощность $P_{\text{НОМ}} = 110$ кВт; номинальное линейное напряжение $U_{\text{НОМ}} = 380$ В; номинальная скорость $n_{\text{НОМ}} = 2952$ об/мин; синхронная скорость $n_0 = 3000$ об/мин; число пар полюсов $p = 1$; номинальная частота питающей сети $f_{\text{НОМ}} = 50$ Гц; номинальный фазный ток статора $I_{\text{НОМ}} = 192$ А; номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{\text{НОМ}} = 0,935$; номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,93$; кратность максимального момента $M_{\text{МАКС}} / M_{\text{НОМ}} = 3,0$; кратность пускового момента $M_{\text{ПУСК}} / M_{\text{НОМ}} = 1,9$; кратность пускового тока $I_{\text{ПУСК}} / I_{\text{НОМ}} = 8,0$; активное $R1 = 0,049$ Ом и индуктивное $X1 = 0,186$ Ом сопротивления статора; активное $R2' = 0,036$ Ом и индуктивное $X2' = 0,277$ Ом приведенные сопротивления ротора; момент инерции двигателя $J_{\text{ДВ}} = 1,412$ кгм².

Электродвигатель такого типа по своим техническим параметрам соответствует приводным двигателям компрессорной станции теплового насоса *HYDROCIAT 2500B X*, который принят за базовую установку.

На рис. 1,а представлена структурная модель силового канала двухдвигательной линейризованной электромеханической системы на базе асинхронного двигателя [3].





б)

Рис.1. Структурная модель и диаграммы переменных силового канала электропривода компрессорной станции с двумя нерегулируемыми асинхронными электродвигателями

а) структурная модель, б) диаграммы переменных

Блок EU задает номинальное действующее значение фазного напряжения сети, а блоки EM_{c1} и EM_{c2} формируют характерную для компрессоров зависимость момента сопротивления от угловой скорости для каждого из двигателей ($M_c \sim \omega^{1,25}$).

Объект исследования в виде компрессорной станции представлен апериодическим звеном первого порядка с коэффициентом передачи K_o и весьма значительной постоянной времени T_o (в реальных станциях ее величина может составлять десятки минут и более). Подсистема $AU-AM$ обеспечивает реализацию требуемого алгоритма работы. По входным сигналам $U1$ и T_i логическая схема на начальном этапе обеспечивает последовательный запуск двигателей, а затем, при достижении граничных значений температуры T_{max} или T_{min} , на выходах $AM1$ и $AM2$ формируются сигналы соответственно на поочередное отключение или включение электродвигателей. Тем самым, моделируется прямой пуск и останов приводов компрессоров станции.

С помощью осциллографа $Score$ фиксируются графики изменения мгновенных значений: температуры T на выходе компрессорной станции в коридоре $T_{min} \dots T_{max}$; скоростей каждого из двигателей ω_1, ω_2 ; развиваемых полных моментов двигателей $M1, M2$; потребляемой из сети общей полезной мощности $P = P1 + P2$, где $P1 = M1 \times \omega_1, P2 = M2 \times \omega_2$.

Параметры элементов силового канала рассчитываются в соответствии со следующими выражениями:

- эквивалентное активное сопротивление двигателя: $R_e = R1 + R2$;
- эквивалентная постоянная времени: $T_e = (X1 + X2) / (2 \times \pi \times f_{ном} \times R_e)$;
- коэффициент связи по моменту: $K_m = M_{ном} / (1,5 \times p \times I_{ном})$;
- полный момент инерции системы: $J = J_{дв} + J_{мех}$, где $J_{мех} = 2 \times J_{дв}$;
- коэффициент передачи по ЭДС двигателя: $K_e = E_{макс} / \omega_{ном}$,

где $E_{макс} = E_{ном} = U_{ном} / 1,73 - I_{ном} \times R_e$;

- коэффициент связи по нагрузке: $K_{мс} = M_{ном} / \omega_{ном}^{1,25}$;

- коэффициент передачи станции: $K_o = T_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}}$, где $\omega_{\text{ном}} = \omega 1_{\text{ном}} + \omega 2_{\text{ном}}$;

- постоянная времени объекта: $T_o = 50$ с.

Для наглядности и возможности визуального анализа результатов постоянная времени компрессорной станции принята равной 50с, что более чем на порядок меньше реальной инерционности, однако при этом имеется возможность исследования поведения в переходных режимах системы электропривода, быстрдействие которого достаточно высокое.

Анализируя полученные результаты (рис. 1,б), можно отметить следующие основные моменты. Система фактически выполняет основную задачу – поддержание температуры в требуемом диапазоне 55 ... 65°C. Диаграммы изменения температуры и скорости наглядно показывает выполнение алгоритма работы. Вначале запускается второй двигатель (пунктирная линия). В середине диапазона при температуре 35°C включается первый двигатель (сплошная линия). Затем, при достижении температуры 65°C второй двигатель отключается, а первый остается в работе. Температура начинает снижаться и по достижении нижней границы 55°C вновь включается второй двигатель, что вызывает рост температуры до верхней границы. После этого последовательность отключения/включения двигателей следующая: первый, второй, первый, второй и т.д.

График изменения момента подтверждает тот факт, что переходные процессы при прямом пуске асинхронного электродвигателя сопровождаются значительными бросками момента и, следовательно, тока, что приводит к превышению в 5 – 6 раз его номинального значения [4]. Это вызывает возрастание потерь энергии в переходных режимах и существенное увеличение потребляемой мощности, что иллюстрирует полученная диаграмма активной мощности. Кроме этого, наличие больших частых пусковых токов приводит к перегрузке сети и ограничению допустимых включений компрессора в течение часа. Необходимо отметить также, что выделяющиеся в двигателе повышенные потери вызывают его дополнительный нагрев, что уменьшает ресурс работы всех его узлов и элементов [5].

Все отмеченные энергетические факторы следует отнести к недостаткам, однако инерционность по каналу температуры в реальной компрессорной станции существенно больше, чем принятое значение при моделировании, поэтому негативное влияние указанных проблем на практике будет меньше. Кроме этого, рассмотренный способ управления имеет и значительный положительный энергетический показатель, который связан с тем, что достаточно длительные отрезки времени в работе находится только один двигатель, а другой отключен от сети и потребляемая мощность всей установкой в эти периоды снижается вдвое. Это наглядно иллюстрирует график изменения активной мощности (с 220 кВт при работе двух двигателей до 110 кВт, когда в работе остается только один).

Фактически основной недостаток рассмотренной системы, связанный с прямыми пусками двигателей, может быть устранен с помощью, так называемых, устройств плавного пуска, которые в последнее время получили

массовое применение и специально разработаны для решения проблемы ограничения пусковых токов асинхронных короткозамкнутых двигателей [6].

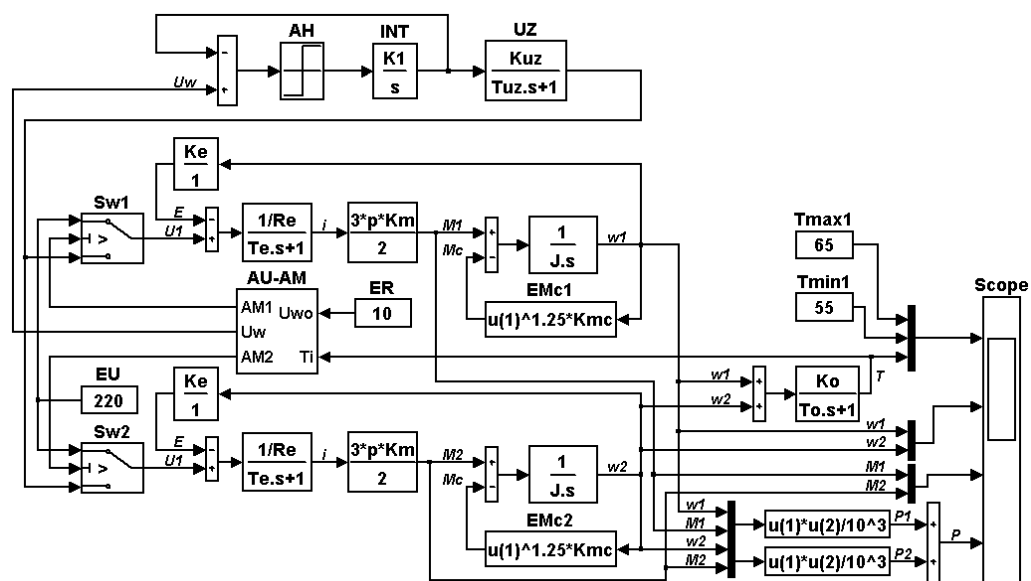
Для варианта двухдвигательной компрессорной станции достаточно использовать одно устройство. В этом случае алгоритм функционирования системы заключается в том, что вначале плавно разгоняется один двигатель до номинальной скорости и переключается на работу от сети, а затем обеспечивается плавный запуск второго двигателя. После этого устройство плавного пуска автоматически реализует рассмотренный ранее алгоритм поддержания температуры в необходимых пределах за счет поочередного ввода и вывода из работы электродвигателей компрессоров с плавным изменением напряжения, подводимого к статорным обмоткам двигателей. Отметим, что чаще всего устройство плавного пуска выполняется на базе схемы известных тиристорных регуляторов напряжения.

На рис. 2,а представлена структурная модель двухдвигательной электромеханической системы компрессорной станции с использованием устройства плавного пуска.

Фактически, предыдущая модель дополнена двумя дополнительными элементами. Устройством плавного пуска UZ в виде апериодического звена первого порядка с коэффициентом передачи K_{uz} и постоянной времени T_{uz} , а также, типовым задатчиком интенсивности первого порядка (содержит охваченные единичной отрицательной обратной связью последовательно соединенные нелинейный элемент AH с релейной характеристикой и интегратор INT с коэффициентом $K1$).

Расчетные формулы следующие:

- коэффициент передачи устройства плавного пуска: $K_{uz} = U_{ном} / (1,73 \times 10)$;
- постоянная времени: $T_{uz} = 0,001$ с;
- коэффициент интегратора для случая одинаковой величины ограничений сигналов в канале управления: $K1 = \varepsilon_{макс} / \omega_{макс}$.



а

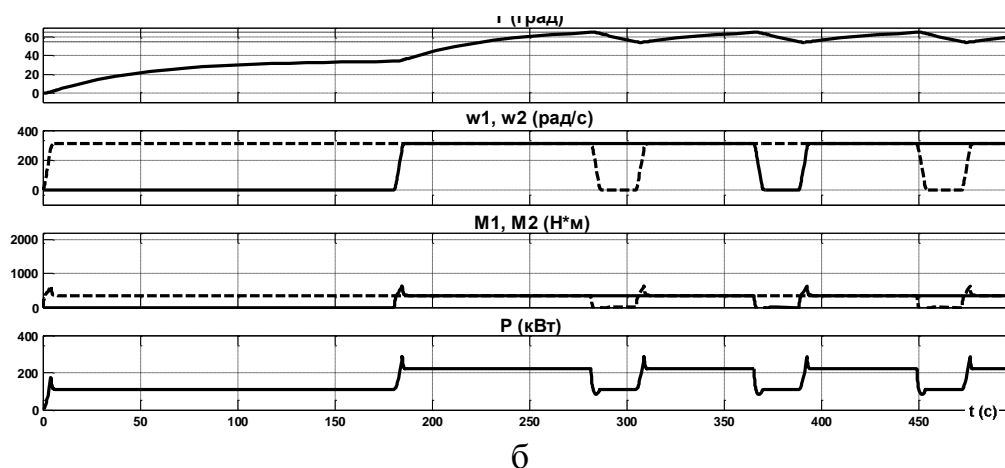


Рис. 2. Структурная модель и диаграммы переменных электропривода компрессорной станции с использованием устройства плавного пуска
 а) структурная модель, б) диаграммы переменных

Подсистема *AU-AM* в целом построена аналогично предыдущей системы, но алгоритм ее работы имеет свои отличия. На один из входов подается сигнал заданной скорости U_{wo} , величину которого определяет блок *ER*. На выходе подсистемы имеет место сигнал заданной скорости U_w , который подается или снимается со входа датчика интенсивности при определенных значениях температуры (35°C , 55°C и 65°C). Сигналы с выходов *AM1*, *AM2* управляют соответствующими ключами S_{w1} , S_{w2} . При замкнутом нижнем контакте ключей к одному из двигателей подключается устройство плавного пуска, в случае, когда замкнут верхний контакт ключей на статорную обмотку двигателя поступает номинальное значение фазного напряжения сети, задаваемое блоком *EU*.

Результаты моделирования (рис. 2,б) показывают отсутствие значительных бросков в кривых момента и мощности в периоды запуска двигателей, а скорость при этом изменяется линейно плавно, что обеспечивается датчиком интенсивности за счет ограничения ускорения на допустимом уровне. Все остальные процессы протекают аналогично структуре с нерегулируемым электроприводом. Следует отметить, что за счет применения устройства плавного пуска система становится несколько дороже и сложнее.

Общим недостатком рассмотренных систем является невозможность реализовать алгоритм поддержания требуемого значения температуры. Для решения этой задачи целесообразно использовать частотно-регулируемый электропривод компрессоров на базе системы ПЧ-АД со звеном постоянного тока, который в большинстве случаев рекомендуется сегодня для тепловых насосов.

Универсальность предлагаемой системы для компрессорной станции заключается в возможности реализации обоих способов управления.

Если устройство плавного пуска заменить преобразователем частоты, то абсолютно аналогично предыдущей системе решается задача регулирования температуры в необходимом диапазоне.

Для обеспечения поддержания заданного значения температуры система должна быть замкнутой и содержать регулятор одного из технологических параметров (для теплового насоса это температура).

В этом случае для двухдвигательного варианта применяется один преобразователь частоты, который сначала плавно запускает один двигатель до рабочей скорости и переводит его на работу от сети. Затем плавно разгоняется другой двигатель до скорости, при которой устанавливается требуемая температура и остается работать от преобразователя частоты. При отклонении температуры в результате внешних воздействий от заданного значения преобразователь частоты регулирует скорость двигателя в нужном направлении для быстрого восстановления необходимой температуры. Таким образом, в работе всегда находятся оба двигателя. Один функционирует в номинальном режиме, получая питание напрямую от сети, а другой работает в типовой схеме ПЧ-АД с регулированием скорости.

Структурная модель двухдвигательной компрессорной станции с частотно-регулируемым электроприводом изображена на рис. 3,а.

Кроме преобразователя частоты UZ и задатчика интенсивности система содержит цифровой ПИД-регулятор, который имеется практически во всех современных преобразователях частоты.

Контролируемым технологическим параметром является температура, сигнал о фактическом значении которой через датчик температуры UT подается на вход регулятора температуры AT в виде отрицательной обратной связи. Выходной сигнал регулятора температуры является входным сигналом управления преобразователем частоты, поэтому температура на выходе теплового насоса изменяется фактически за счет изменения скорости двигателей.

Требуемые расчетные соотношения.

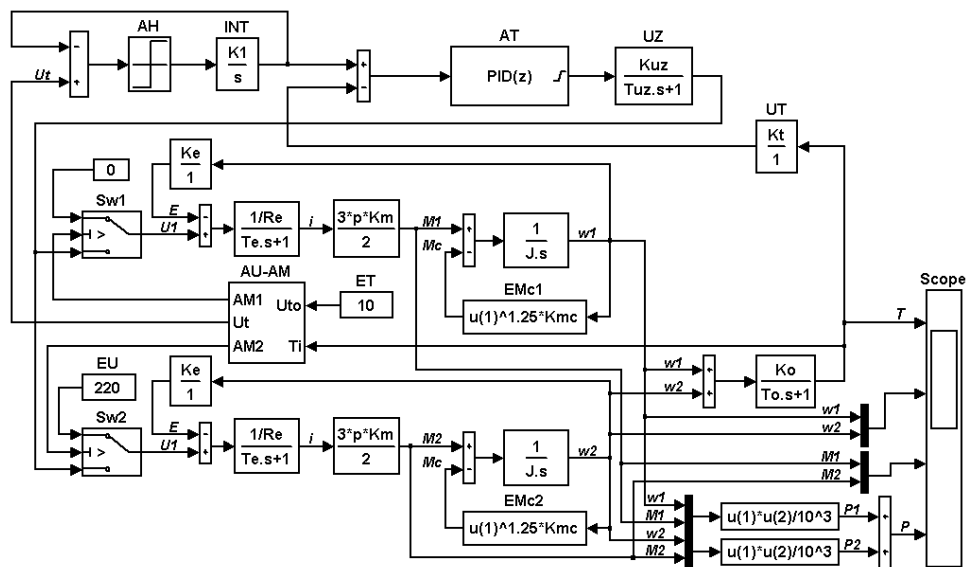
Регулятор температуры AT :

- пропорциональная часть: $K_p = (J \times R_e) / (a_t \times T_{uz} \times K_{uz} \times 1,5 \times p \times K_m \times K_t \times K_o)$;
- интегрирующая составляющая: $K_i = K_e / (a_t \times T_{uz} \times K_{uz} \times K_t \times K_o)$;
- дифференцирующая: $K_d = (T_e \times J \times R_e) / (a_t \times T_{uz} \times K_{uz} \times 1,5 \times p \times K_m \times K_t \times K_o)$,

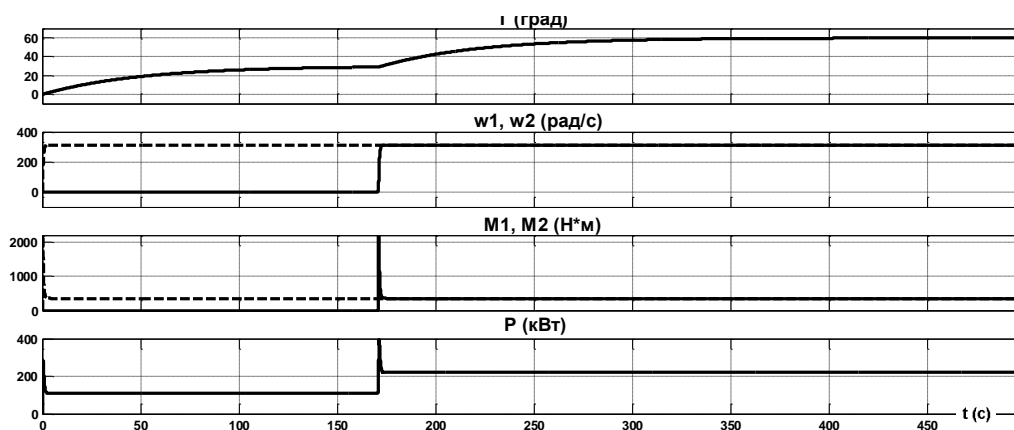
где a_t – настроечный параметр контура регулирования температуры (стандартное значение $a_t = 2$).

Коэффициент передачи обратной связи по температуре: $K_t = 10 / T_{\text{ном}}^\circ$.

Подсистема $AU-AM$ по структуре полностью аналогична системе с устройством плавного пуска, только на вход от блока ET подается сигнал требуемой температуры $U_{\text{то}}$, а с выхода снимается сигнал заданного значения температуры U_t , который поступает на вход задатчика интенсивности. Ключ $Sw2$ обеспечивает первоначальный плавный запуск второго двигателя от преобразователя частоты (замкнут нижний контакт) с последующим переключением его на работу от сети (замкнут верхний контакт). Ключ $Sw1$ замыкает свой нижний контакт при температуре 35°C , тем самым плавно разгоняет второй двигатель до скорости, когда температура достигает заданного значения, после чего он остается работать от преобразователя частоты.



а



б

Рис. 3. Структурная модель и диаграммы переменных компрессорной станции с частотно-регулируемым электроприводом
а) структурная модель, б) диаграммы переменных

Результаты моделирования представлены на рис. 3,б. После плавного запуска системы устанавливается требуемое значение температуры 60°C , которое поддерживается на этом уровне при изменении температуры в случае воздействия внешних возмущающих факторов. В эти моменты имеют место кратковременные переходные процессы, связанные с изменением скорости двигателя для быстрого восстановления заданного значения температуры.

Отметим и некоторые другие преимущества применения частотно-регулируемого электропривода для компрессорных станций [7]. Электропривод компрессора с частотным управлением обеспечивает поддержание рабочего давления в системе с точностью до 0,1 бар и мгновенно реагирует на изменение давления в сети. А каждый лишний бар давления нагнетания увеличивает электропотребление компрессора на 6-8%. Наиболее весомый вклад в экономию электроэнергии дает точное соответствие производительности компрессора с частотным приводом реальной потребности в сжатом хладагенте в данный момент времени.

В качестве относительных недостатков следует считать повышенные стоимостные показатели и сложность настройки системы, необходимость в проработке вопросов обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя частоты с сетью и двигателем. Кроме того нет возможности снизить потребление из сети активной мощности для варианта реализации алгоритма поддержания температуры на заданном уровне, поскольку в этом случае одновременно в работе находятся оба двигателя. Однако за счет других факторов, характерных для частотно-регулируемого электропривода (например, ресурсосбережение), в целом энергосберегающие аспекты имеют место.

Полученные результаты исследований показывают, что все три рассмотренных способа управления режимом работы компрессорной станцией теплового насоса позволяют решить каждый свою конкретную задачу. Поэтому при выборе структуры электромеханической системы желательно провести многокритериальный анализ по нескольким оценкам: динамические и энергетические характеристики, стоимостные и массогабаритные показатели, ресурсосбережение, надежность, экономичность и др.

Выводы

Если компрессорная станция теплового насоса должна обеспечивать только изменение температуры в требуемом диапазоне, то целесообразно использование электромеханической системы с устройством плавного пуска. Для случая, когда технологическим требованием является поддержание заданного значения температуры, что является обязательным условием, например, для объектов жилищно-коммунального хозяйства, однозначно применение частотно-регулируемого электропривода, который в силу своей универсальности, при необходимости, позволяет решить и задачу регулирования температуры в необходимых границах.

Список литературы: 1. Рей Д., Макмайкл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с. 2. Морозюк, Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса, 2006. – 412 с. 3. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с. 4. Онищенко, Г. Б. Электрический привод : учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Б. Онищенко. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 288 с. 5. Москаленко, В. В. Электрический привод : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Москаленко. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с. 6. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. 7. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ииматов, В. Н. Поляков; Под ред. И. Я. Браславского. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

УДК 62.83.52

Вибір раціональних систем автоматизованого управління компресорних станцій теплового насосу/ Чермалих А. В., Чермалих В. М., Майданський І. Я. // Вісник НТУ «ХП». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків: НТУ «ХП». – 2012. - №50(956). С. 107-116

На основі аналізу режимів роботи теплового насоса розглянуті можливі структури систем управління електроприводом компресорів теплонасосної установки. За допомогою структурних моделей отримані графіки зміни контрольованих перемінних. За

результатами моделювання надані рекомендації щодо раціональності застосування систем управління компресорною станцією в залежності від оціночних критеріїв та технологічного режиму роботи теплового насоса. Іл.: 3. Бібліогр.: 7. назв.

Ключові слова: насос, електропривод, компресор, моделювання.

UDK 62.83.52

Rational choice systems control compressor station heat pump/ Chermalykh A., Chermalykh V., Maidanskyi I. //Bulletin of NTU “KhPI”. Subject issue: New desicions of modern technologies. – Kharkov: NTU “KhPI”. – 2012. - №50(956). P. 107-116

Based on the analysis of the heat pump mode, the possible structures of the control electric compressor heat pump installation. Using structural models obtained graphs of the controlled variables. Simulation results are given guidance on the application of rational management systems compressor station, depending on the evaluation criteria and the technological regime of the heat pump. Im.:3 : Bibliogr.: 7.

Keywords: pump, electric, compressor, modeling.

Надійшла до редакції 20.09.2012