

УДК 62.83.52

И.В. Кушнир

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКОЙ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

На основі аналізу режимів роботи компресорних станцій теплових насосів розглянуті можливі структури систем управління теплонасосної установкою. За допомогою структурних моделей отримані графіки зміни контрольованих змінних. За результатами моделювання надані рекомендації щодо застосування електроприводу з частотним регулюванням швидкості.

На основе анализа режимов работы компрессорных станций тепловых насосов рассмотрены возможные структуры систем управления теплонасосной установкой. С помощью структурных моделей получены графики изменения контролируемых переменных. По результатам моделирования даны рекомендации относительно применения электропривода с частотным регулированием скорости.

Based on the analysis of modes of heat pumps, compressor stations, the possible structures of the heat pump control unit. Using structural models obtained graphs of the controlled variables. Simulation results are given advice on the application of electric drive with frequency speed control.

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. Обоснование рациональности применения частотно-регулируемого электропривода на основе исследования существующих различных способов автоматизированного управления компрессорными установками теплового насоса с помощью структурных моделей.

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 тепловых насосов, практически полностью отсутствуют сведения о методах решения проблемы управления тепловым насосом со стороны электропривода. Как известно, одной из основных составных частей теплового насоса является компрессорная станция, оптимальная работа которой напрямую зависит от способа 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 использованием современного частотно-регулируемого электропривода для управления 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 ($55...65^{\circ}\text{C}$) или поддержание температуры на требуемом уровне (как правило, в районе 60°C). 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 $55...65^{\circ}\text{C}$ 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. $M1 \rightarrow t^{\circ} \approx 65^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Откл. $M2 \rightarrow t^{\circ} \approx 55^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Вкл. $M2 \rightarrow t^{\circ} \approx 65^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Откл. $M1$ 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 данными: номинальная мощность $P_{nom} = 110$ кВт; номинальное линейное напряжение $U_{nom} = 380$ В; номинальная скорость $n_{nom} = 2952$ об/мин; синхронная скорость $n_0 = 3000$ об/мин; число пар полюсов $p = 1$; номинальная частота питающей сети $f_{nom} = 50$ Гц; номинальный фазный ток статора $I_{nom} = 192$ А; номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{nom} = 0,935$; номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{nom} = 0,93$; кратность максимального момента $M_{max} / M_{nom} = 3,0$; кратность пускового момента $M_{pysk} / M_{nom} = 1,9$; кратность пускового тока $I_{pysk} / I_{nom} = 8,0$; 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 $J_{dv} = 1,412$ кгм².

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

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

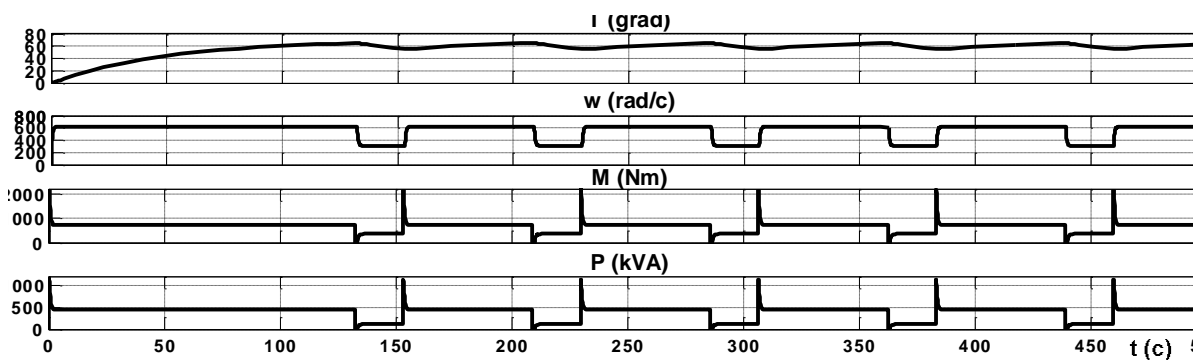
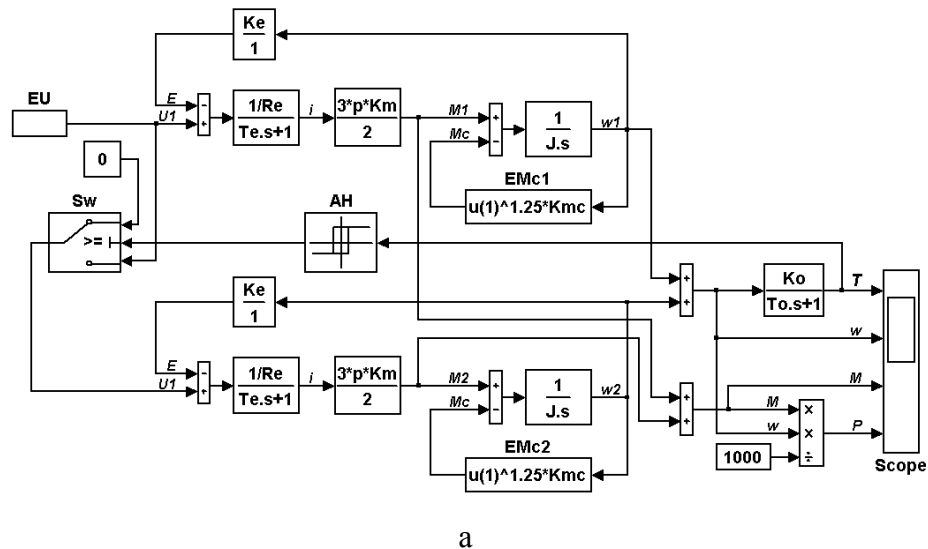


Рисунок 1 – Структурная модель и диаграммы переменных силового канала электропривода компрессорной станции с двумя нерегулируемыми асинхронными электродвигателями

Блок EU на входе 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. 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). Нелинейный элемент $АН$ задает требуемый коридор изменения температуры (ширина петли гистерезиса составляет $65^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C} = 10^\circ\text{C}$). В зависимости от значения логического сигнала на выходе нелинейного элемента 0 или 1 ключ Sw соответственно подает или снимает питающее напряжение со статорной обмотки одного из двигателей, тем самым моделируется прямой пуск и останов привода второго компрессора. С помощью осциллографа $Scope$ фиксируются графики изменения мгновенных значений температуры T на выходе компрессорной станции, а также суммарных для двух двигателей величин угловой скорости ω , развиваемого момента M и потребляемой из сети полезной мощности P .

Параметры элементов силового канала рассчитываются согласно следующим выражениям:

- эквивалентное активное сопротивление двигателя: $R_e = R1 + R2$;
- эквивалентная постоянная времени: $T_e = (X1 + X2) / (2 \times \pi \times f_{\text{ном}} \times R_e)$;
- коэффициент связи по моменту: $K_m = M_{\text{ном}} / (1,5 \times p \times I_{\text{ном}})$;
- полный момент инерции системы: $J = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}}$, где $J_{\text{мех}} = 2 \times J_{\text{дв}}$;
- коэффициент передачи по ЭДС двигателя: $K_e = E_{\text{max}} / \omega_{\text{ном}}$,
где $E_{\text{max}} = E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} / 1,73 - I_{\text{ном}} \times R_e$;
- коэффициент связи по нагрузке: $K_{\text{mc}} = M_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}}^{1.25}$;
- коэффициент передачи станции: $K_o = T_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}}$, где $\omega_{\text{ном}} = \omega1_{\text{ном}} + \omega2_{\text{ном}}$;
- постоянная времени объекта: $T_o = 50$ с.

Синтезированная модель по некоторым позициям не в полной мере соответствует физическому объекту. Так, отсутствует поочередный ввод в работу двигателей, а включается / отключается только один из них, а другой находится в работе постоянно. Это выполнено с целью не усложнения модели, так как двигатели одинаковые и на поведение системы в целом при моделировании такое решение не влияет. 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, быстродействие которого достаточно высокое.

Анализируя полученные результаты (рисунок 1,б), можно отметить следующие основные моменты. Система фактически выполняет основную задачу – поддержание температуры в требуемом диапазоне $55 \dots 65^\circ\text{C}$. Диаграммы изменения температуры и скорости наглядно показывает выполнение алгоритма работы. При достижении температуры верхней границы 65°C один двигатель отключается, а другой остается в работе. В результате температура начинает снижаться и по достижении нижней границы 55°C включается второй двигатель, что вызывает рост температуры до верхней границы и далее цикл повторяется.

График изменения момента подтверждает тот факт, что переходные процессы при прямом пуске асинхронного электродвигателя сопровождаются значительными бросками момента и тока, в 5 – 6 раз выше номинального [4]. Это вызывает возрастание потерь

енергии 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 фактор, который связан с тем, что достаточно длительные отрезки времени в работе находится только один двигатель, а другой отключен и потребляемая мощность всей установкой в эти периоды значительно снижается. 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 или мягкого пуска УПП, 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 плавного пуска. 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 запуска 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. Устройства плавного запуска реализуются на базе известных тиристорных регуляторов напряжения ТРН.

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

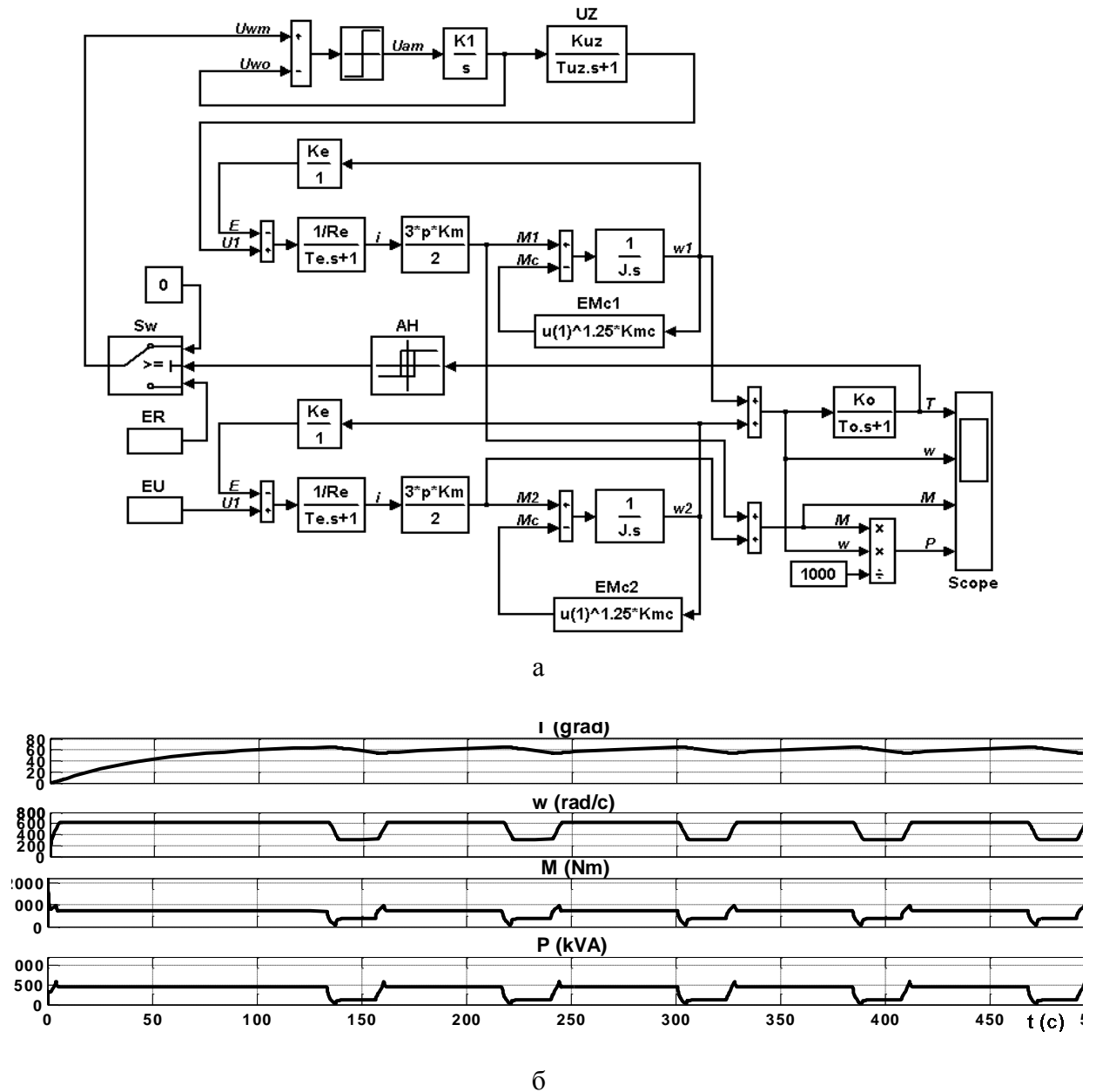


Рисунок 2 – Структурная модель и диаграммы переменных электропривода компрессорной станции с использованием устройства плавного пуска

Фактически предыдущая модель дополнена двумя элементами: устройством плавного пуска UZ в виде аperiodического звена первого порядка с коэффициентом передачи K_{uz} и постоянной времени T_{uz} и типовым задатчиком интенсивности первого порядка, который содержит охваченные единичной отрицательной обратной связью последовательно соединенные нелинейный элемент с релейной характеристикой и интегратор с коэффициентом $K1$.

Расчетные формулы следующие:

- коэффициент передачи преобразователя: $K_{uz} = U_{ном} / (1,73 \times 10)$;
- постоянная времени: $T_{uz} = 0,001$ с;

- коэффициент интегратора для случая одинаковой величины ограниченных сигналов в канале управления: $K_I = \varepsilon_{\max} / \omega_{\max}$.

Ключ S_w подает или снимает входной сигнал задатчика интенсивности, который формируется блоком ER .

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

В этом случае для двухдвигательного варианта применяется один преобразователь частоты, который сначала плавно запускает первый двигатель до рабочей скорости и переводит его на работу от сети. Затем плавно разгоняется второй двигатель до скорости, при которой устанавливается требуемая температура и при отклонении температуры в результате внешних воздействий от заданного значения преобразователь частоты регулирует скорость второго 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 второй работает в типовой схеме ПЧ-АД с регулированием скорости.

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

Кроме преобразователя частоты UZ и задатчика интенсивности система содержит цифровой ПИД-регулятор скорости AR , 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 системы управления в виде отрицательной обратной связи. Ключ ручного управления MS_w позволяет в процессе моделирования имитировать внешние возмущения, которые вызывают отклонения температуры от заданного значения.

Требуемые расчетные соотношения.

Регулятор скорости AR :

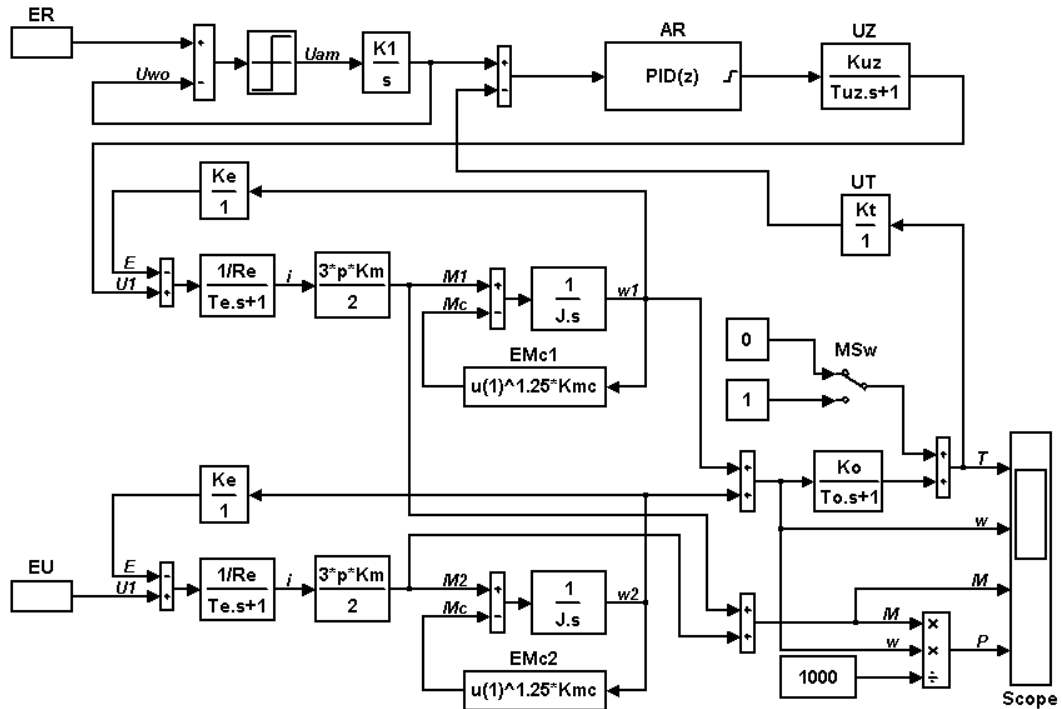
- пропорциональная часть: $K_{pw} = J \times R_e / (a_w \times T_{uz} \times K_{uz} \times 1,5 \times p \times K_m \times K_w)$;

- интегрирующая составляющая: $K_{iw} = K_e / (a_w \times T_{uz} \times K_{uz} \times K_w)$;

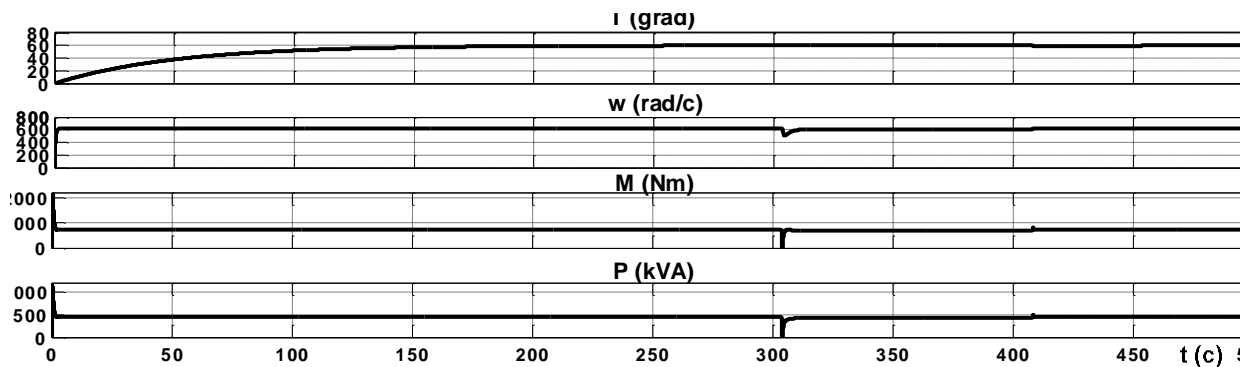
- дифференцирующая: $K_{dw} = T_e \times J \times R_e / (a_w \times T_{uz} \times K_{uz} \times 1,5 \times p \times K_m \times K_w)$,

где a_w – настроечный параметр (стандартное значение $a_w = 2$), коэффициент связи по скорости $K_w = 10 / \omega_{\text{ном}} = 10 \times K_o / T^{\circ}_{\text{ном}}$

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



а



б

Рисунок 3 – Структурная модель и диаграммы переменных компрессорной станции с частотно-регулируемым электроприводом

Результаты моделирования представлены на рисунке 3,б. После плавного запуска системы устанавливается заданное значение температуры 60°C . В кривых всех контролируемых переменных практически отсутствуют какие либо колебания, что соответствует протеканию стационарных процессов. На отметке 300 с смоделировано ступенчатое возрастание температуры на один градус, а на отметке 400 с – снижение температуры на один градус. В эти моменты имеют место кратковременные переходные процессы, связанные с уменьшением в первом случае и увеличением во втором скорости двигателя для быстрого восстановления требуемого значения температуры. При этом, на диаграмме температуры изменений практически нет.

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. При этом 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 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.

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, 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с
2. Т. В. Морозюк 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. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.