

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПУСКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЗИСТОРНО-ТИРИСТОРНЫМИ МОДУЛЯМИ

Запропоновано електропривод, що містить асинхронний двигун, в статорних і роторних колах якого для управління використовуються резистори і тиристри, включені між собою різними способами, утворюючи різноманітність силових схем перетворювачів із резисторно-тиристорними модулями. Розроблено аналітичний метод визначення часу розбігу асинхронного електроприводу. Дано рекомендації для проектування та впровадження в різні механізми й агрегати зазначених електроприводів. Наукова новизна полягає в тому, що запропонований метод розрахунку дозволяє визначити час розбігу при обмеженні величин перехідних струмів і моментів електродвигуна. Встановлено, що сумарний момент інерції і статичний момент електроприводу не роблять істотного впливу на максимальне значення перехідного електромагнітного моменту. Найбільше ці параметри впливають на час перехідного процесу, частоту коливань електромагнітного моменту і швидкість обертання електродвигуна. Використований метод розрахунку дозволяє вибрати найбільш прості закони управління пуском електропривода і застосувати розімкнуту систему управління без підвищення вартості силового перетворювача. Бібл. 17, рис. 2.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, резисторно-тиристорний модуль, пуск, регулювання кута відкриття тиристора, момент інерції, статичний момент.

Предложен электропривод, который содержит асинхронный двигатель, в статорных и роторных цепях которого для управления используются резисторы и тиристоры, включенные между собой разными способами, образуя разнообразие силовых схем преобразователей с резисторно-тиристорными модулями. Разработан аналитический метод определения времени разбега асинхронного электропривода. Даны рекомендации для проектирования и внедрения в различные механизмы и агрегаты указанных электроприводов. Научная новизна заключается в том, что предложенный метод расчета позволяет определить время разбега и торможения при ограничении величин переходных токов и моментов электродвигателя. Установлено, что суммарный момент инерции и статический момент электропривода не оказывают существенного влияния на максимальное значение переходного электромагнитного момента. Больше всего эти параметры влияют на время переходного процесса, частоту колебаний электромагнитного момента и скорость вращения электродвигателя. Используемый метод расчета позволяет выбрать наиболее простые законы управления пуском электропривода и применить разомкнутую систему управления без увеличения стоимости силового преобразователя. Библ. 17, рис. 2.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, резисторно-тиристорный модуль, пуск, регулирование угла открывания тиристора, момент инерции, статический момент.

Введение. Автоматизация производственных процессов требует обеспечения различных режимов работы технологических механизмов и агрегатов. В отношении пусковых режимов наиболее полно удовлетворяют требованиям асинхронные электроприводы (АЭП) с параметрическим фазовым управлением, в которых используются тиристорные преобразователи напряжения или преобразователи частоты, включенные в статорные цепи асинхронного двигателя (АД) [1-10]. Относительно простые параметрические методы управления АЭП являются наиболее широко распространенными на практике, их эксплуатация будет применяться и в будущем для АД малой и средней мощности [11-17].

Выбор силовой схемы управления АД определяет возможности АЭП по реализации пусковых режимов работы. Технические и экономические показатели силовой схемы играют главную роль в выборе области применения АЭП и выявляют целесообразность их промышленного внедрения. Однако, до сих пор нет четкого мнения, где и в каком случае применять ту или иную силовую схему параметрического управления асинхронного электропривода, а недостаточно обоснованный выбор силовой схемы может привести к значительным экономическим потерям.

Процесс выбора рациональной схемы можно рассматривать как задачу оптимизации ее качества протекания статических и динамических процессов при пуске АЭП. К основным показателям оценки этих режимов относят времена разгона АЭП с учетом влияния электромагнитного и статического моментов, что есть актуальной задачей.

Одним из путей решения этой задачи является использовать расчетные и экспериментальные данные,

определяющие времена разгона АЭП, которые приведены в отечественной и зарубежной литературе. Однако этот путь не дает однозначного ответа на эту задачу из-за различных условий работы механизмов, использования только некоторых типов преобразователей и т.п. [9-13, 17]. Притом, он может привести к неверным результатам, так как применение той или иной силовой схемы преобразователя определяется техническими и экономическими условиями применительно к каждому конкретному промышленному механизму.

Постановка задачи. Всесторонний анализ разнообразия силовых схем управления и исследование основных режимов АД с целью определения времени пуска АЭП связан с большим объемом аналитических вычислений и необходимостью проведения экспериментальных исследований. Поэтому для систематизированного анализа, получения расчетных значений времени пуска для рациональных вариантов силовых схем для цепей двигателя наиболее удобно пользоваться обобщенной (общей) схемой управления АД и ее математическим описанием, которое позволяет создать общий алгоритм управления и эффективно применять аналитические методы расчета и при исследовании использовать ПЭВМ. Для построения обобщенной схемы управления АД предложен модульный способ, реализация которого осуществляется путем применения элементарных модулей: силового и связи. Силовой модуль (СМ) содержит, как правило, управляемый клапан и пассивные элементы (активные сопротивления R , конденсаторы C или индуктивности L). Модуль связи (МС) состоит только из

пассивных элементов. В СМ, кроме тиристора, могут быть применены диоды, симисторы или другие полупроводниковые приборы. Параметры R , C , L элементов СМ и МС при необходимости могут изменяться импульсным, широтным-импульсным или другим методом. Однако при этом модели становятся более сложными, так как параметры элементов СМ и МС изменяются с помощью дополнительных управляемых вентилей. При построении обобщенной схемы управления АД вполне достаточно применить наиболее простые модули, чтобы получить общую структуру, из которой образуется достаточное количество вариантов силовых схем. Так, с использованием простейших силовых модулей, в состав которых входят два сопротивления и тиристор, и модуля связи, содержащего только одно активное сопротивление, получена обобщенная схема параметрического управления АД силовая схема которой приведена в [14]. Последовательное включение силового тиристора и активного сопротивления, параллельно которым подключено второе дополнительное сопротивление, образует силовой модуль, который назван резисторно-тиристорным (РТМ). Каждый РТМ является не только отдельным функциональным элементом, но и конструктивно законченным блоком-модулем.

Наличие тиристорных РТМ при их управлении приводит к изменению эквивалентной величины сопротивления модуля, что обуславливает необходимость математического моделирования этих вентилей с учетом режимов их работы и особенностей использования их в электроприводе. Такой подход изложен в [14], суть которого заключается в том, что работа вентилей определяется логическим синтезом и переключающимися функциями. Это позволило получить математическое описание работы вентилей в РТМ для различных схем преобразователей и создать общий алгоритм для расчета на ПЭВМ времени пуска АЭП.

Эквивалентное сопротивление i -го резисторно-тиристорного модуля определяется по формуле:

$$R_{mi} = \frac{R_{s(r)} [rK_i + r_{s(r)}]}{R_{s(r)} + [rK_i + r_{s(r)}]}, \quad (1)$$

где $R_{s(r)}$ – дополнительные сопротивления, включенные в цепь статора (ротора); $r_{s(r)}$ – сопротивления обмоток статора (ротора); r – сопротивление вентиля в закрытом состоянии, K_i – функция, характеризующая состояние вентилей (при $K_i = 0$ – вентиль открыт, при $K_i = 1$ – закрыт).

Материал и результаты исследований. Для учета влияния процессов пуска на режим работы механизма необходимо знание их длительности и характера протекания. Определение времени разбега проще всего производится графоаналитическим методом. Для этого строим кривую момента двигателя в долях номинального момента при заданном значении напряжения и кривую статического момента, также выраженные в долях номинального момента двигателя в зависимости от скольжения. Затем определяем избыточный момент, равный разности между моментом двигателя и статическим моментом, и разбиваем кривую избыточного момента на ряд прямоугольников m_{S1} , m_{S2} , ..., m_{Sn} и так далее, а затем определяем время разбега или выбега по известной формуле:

$$t_n = T_a \left[\frac{\Delta S_1}{\Delta m_{S1}} + \frac{\Delta S_2}{\Delta m_{S2}} + \dots + \frac{\Delta S_n}{\Delta m_{Sn}} \right],$$

где T_a – механическая постоянная времени; ΔS_1 , ΔS_2 , ..., ΔS_n – участки скольжения двигателя.

При разбеге ΔS_n – отрицательны, а Δm_{Sn} – положительны. При выбеге ΔS_n – положительны, а Δm_{Sn} – отрицательны.

Однако, графоаналитический метод не удобен, не рационален и не может быть в полной мере использован. В тоже время для расчета времени пуска АЭП в модели лучше использовать аналитический метод, при котором используется общее уравнение движения электропривода. Это позволяет не только определять продолжительность переходного процесса при пуске, но выразить его динамику при переходе от одной частоты вращения ротора к другой.

Время пуска асинхронного электропривода t_n при начальной угловой скорости ротора ω_{rn} определим аналитическим путем под действием постоянного статического момента нагрузки M_c и момента инерции электропривода J_Σ по выражению:

$$t_n = \frac{J\omega_{rn}}{M_c} \left\{ \left[\frac{(b-b_1)b_1}{a^2} \sqrt{\left(\frac{b_1}{a}\right)^2 - \frac{c}{a}} - \frac{b-b_1}{a} \right] + \ln \left[S + \frac{b_1}{a} + \frac{\sqrt{\left(\frac{b_1}{a}\right)^2 - \frac{c}{a}}}{S_H} \right] + \left[\frac{b_1}{a} - \sqrt{\left(\frac{b_1}{a}\right)^2 - \frac{c}{a}} \right] \right\} \quad (2)$$

Коэффициенты выражения (2) определяются следующим образом:

$$a = (1 + \tau_2)^2 (r_A + r_{2A})^2 + [X_A + (1 + \tau_1)X_a]^2;$$

$$b = (1 + \tau_1)(1 + \tau_2) + (r_A + r_{2A})(r_a + r_{2a}) \times$$

$$\times \left[X_A + (1 + \tau_1)X'_a \right] \cdot \tau_1 \cdot \frac{(r_A + r_{2A})(r_a + r_{2a})}{X_a};$$

$$b_1 = b - \frac{K_m U_n^2 (r_a + r_a)}{2M_c \omega_{rn}};$$

$$c = (1 + \tau_2)^2 (r_a + r_{2a}) + \tau_1^2 \frac{(r_A + r_{2A})^2 (r_a + r_{2a})^2}{X_a^2},$$

где τ_1 , τ_2 – коэффициенты рассеивания статора и ротора; r_A , r_a – активные сопротивления обмоток статора и ротора; X_A , X_a – индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; r_{2A} , r_{2a} – эквивалентные сопротивления РТМ статора и ротора; U_n – линейное питающее напряжение сети; S , S_n – текущее и номинальное скольжение; K_m – кратность максимального момента.

Активные r_A , r_a и индуктивные X_a сопротивления, входящие в переменные коэффициенты, берутся из паспортных данных АД. Эквивалентные сопротивления РТМ r_{2a} и r_{2A} вычисляются с помощью переключающих функций по формуле (1). Как видно из уравнения (2), время пуска АЭП зависит от величины эквивалентных сопротивлений цепей статора и ротора АД, начального и текущего значений его скольжения, напряжения питающей сети и параметров АЭП.

Результаты исследований АЭП показали, что потери электрической энергии в двигателе уменьшаются при изменении эквивалентной величины сопротивлений в цепи статора и ротора АД, однако длительность разбега при этом возрастает с увеличением значений сопротивлений, входящих в РТМ. На рис. 1,а приведены

кривые $t_n = f(R_{об}, R_{\Sigma})$ времени разбега в функции изменения полного сопротивления $R_{об}$ двигателя и суммарной величины эквивалентных сопротивлений R_{Σ} РТМ, на рис. 1,б – от статического момента и при изменении нагрузки для различных значений начального скольжения $S_{нач}$ АД, где время разгона t_n представлено в долях времени пуска t_0 при холостом ходе, а статический момент – в долях критического момента M_k .

При незначительной величине полного сопротивления цепи двигателя, равной только индуктивному сопротивлению контура намагничивания $R_{об} = X_M$ время разгона АЭП практически остается одним и тем же. Однако, при увеличении его до значения, равного индуктивному сопротивлению обмотки статора и более $X \geq X_A$, время разбега значительно увеличивается. При $R_{об} = X_A$ оно увеличивается более чем в 5 раз.

Продолжительность процесса пуска АЭП зависит от величины и характера статического момента M_c . Кривые на рис. 1 не выявляют оптимального значения критического скольжения S_k , обеспечивающего минимальную длительность переходных процессов пуска АЭП при тиристорном параметрическом управлении. Зависимость длительности переходных процессов при пуске от S_k иллюстрируется зависимостями $t_n/T_a = f(S_k)$ (рис. 1,в), приведенными для различных типов силовых схем коммутаторов. С увеличением критического скольжения S_k , определяемого величиной активных сопротивлений статорной и роторной цепей, время разгона АЭД снижается, достигает минимума при некотором значении S_k , зависящим от статического момента M_c , а затем вновь возрастает. Влияние статического момента на величину критического скольжения незначительно. Время разбега АЭП зависит и от кратности максимального момента K_M , определяемого отношением максимального момента M_{max} АЭД к его номинальному значению M_H . Чем больше кратность максимального момента K_M , тем при равных условиях меньше время пуска. В условиях промышленной эксплуатации АЭП необходимо, чтобы время t_n при номинальном и пониженном напряжениях имело наименьшее значение. Здесь важно, чтобы при восстановлении напряжения, например, после отключения короткого замыкания в сети, АЭД быстрее восстанавливал номинальную скорость. Поэтому K_M должен быть максимальным. Рассмотрим влияние кратности максимального момента K_M на время разбега на примере АЭД нормального исполнения 4А, имеющего критическое скольжение $S_k = 0,15$ и приводящего в движение механизм вентиляторного типа. Время разбега t_n выразим в долях механической постоянной времени T_a . Кривые времени разбега для различных значений кратности максимального K_M момента в зависимости от изменения кратности напряжения K_u при пуске двигателя даны на рис. 1,г в виде функций $t_n/T_a = f(K_M, K_u)$.

Кратность напряжения K_u равна отношению действительной величины напряжения U_{ss} на статорных обмотках АЭД к номинальному напряжению сети U_{SH} . На приведенных графиках (рис. 1,г) кривая 1 вычислена при $K_M = 3$, кривая 2 – при $K_M = 2,5$, кривая 3 – при $K_M = 2$ и кривая 4 – при $K_M = 1,5$. Из анализа этих кривых следует, что время разбега АЭД при тиристорном параметрическом управлении сильно зависит от кратности максимального момента: так, например, при увеличении кратности максимального момента с 1,5 до 2,5

время разбега уменьшается при номинальном напряжении в 2 раза, а при напряжении 0,7 номинального – в 2,4 раза. Время разбега АЭП уменьшается не пропорционально увеличению кратности K_M . Так, например, при увеличении K_M с 1,5 до 2 время разбега при напряжении 0,7 номинального уменьшается с 8 до 5,25, т.е. в 1,6 раза, а при изменении кратности максимального момента от 2,5 до 3, время пуска уменьшается с 3,5 до 2,5. За время пуска АЭД потребляет повышенный ток. Зная зависимость тока от времени, нетрудно определить потери электрической энергии и повышение температуры обмоток двигателя.

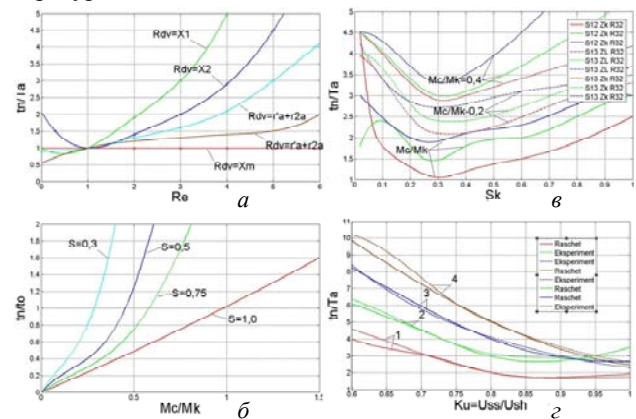


Рис. 1. Кривые времени разбега АД в зависимости от суммарной величины эквивалентных сопротивлений РТМ (а) и статического момента (б), критического скольжения $t_n/T_a = f(S_k)$ (рис. 1,в), приведенными для различных типов силовых схем коммутаторов (в) и кратностей максимального момента и напряжения $t_n/T_a = f(K_M, K_u)$ (г)

При пуске под нагрузкой потери электрической энергии в роторе АЭД всегда больше, чем при пуске вхолостую, и эти потери будут тем больше, чем меньше напряжение на обмотках двигателя. При снижении напряжения с помощью угла α_s на 25 %, т.е. $K_u = 0,75$, количество тепла увеличивается в 4,7 раза, вместе с этим длительность разбега возрастает. Если принять длительность разбега при номинальном напряжении за 1,0 то при понижении напряжения до $K_u = 0,8$ длительность разбега увеличивается в 2,25 раза, а при $K_u = 0,7$ – в 4 раза. Поэтому пуск АЭД при номинальном напряжении невыгоден не только с точки зрения потерь электрической энергии в двигателе, но и по длительности протекания переходного процесса – значительно увеличивается время разгона электропривода. В результате этого появляется выбор оптимума между потерями электрической энергии в двигателе и длительностью процесса пуска АЭП. Предпочтение отдается тому или иному параметру, исходя из требований, предъявляемых к механизму.

В зависимости от закона изменения напряжения на обмотках АЭД по-разному протекает переходный процесс при пуске АЭП. Как видно из представленных на рис. 2 кривых разбега (а) и пускового тока (б), в зависимости от времени при прямом пуске с U_{SH} и $M_c = 0,2$ (кривая 1), двигатель практически мгновенно выходит на номинальную скорость вращения. Повышение $M_c = 0,4$ (кривая 2), $M_c = 0,8$ (кривая 3) и $M_c = 1,0$ (кривая 4) приводит к увеличению времени пуска. Продолжительность протекания пускового тока через обмотки двигателя при этом увеличивается. Кратность пускового тока I_n к пусковому току двигателя при неподвижном роторе I_k практически остается максимальной.

Уменьшение напряжения питания двигателя, например, до $0,5U_{SH}$, приводит к увеличению времени разбега и снижению кратности пускового тока двигателя. Регулируя напряжение питания на обмотках статора двигателя по закону (2), можно изменить время разбега при поддержании кратности пускового тока в нужных пределах (рис. 2, б) [15].

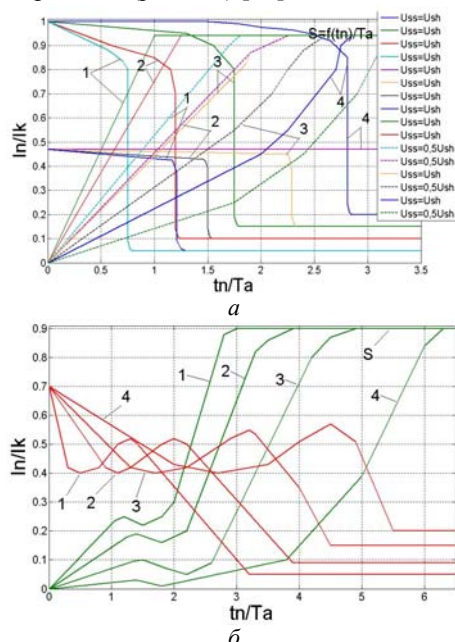


Рис. 2. Кривые разбега и пускового тока АД при параметрическом управлении

Здесь необходимо отметить, что при таком способе управления двигателем можно получить запроваочные или доводочные скорости двигателя, приемлемые для выполнения кратковременных технологических операций механизмов, таких как дотяжка, завравка и другие.

Для реализации такого способа пуска АД используем специальный задатчик интенсивности, формирующий изменение напряжения на статоре по следующему математическому выражению:

$$U_{ss} = \left\{ \begin{array}{l} U_{\text{трор}} \cdot e^{-t_1/T_1} \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_1 \\ U_{\text{мин}} + U_{\text{трор}} \cdot (1 - e^{-t_2/T_2}) \quad \text{при } t_1 \leq t \leq t_2 \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Напряжение трогания в (3) определяется как:

$$U_{\text{трор}} = U_H \sqrt{M_c^0 / M_{\Pi}},$$

где M_c^0 , M_{Π} – соответственно статический момент при неподвижном роторе АД и пусковой момент АД при номинальном напряжении сети. Минимальное напряжение в выражении (3), при котором ротор АД ещё вращается, зависит от статического момента и определяется как:

$$U_{\text{мин}} = U_H \sqrt{M_c^s / M^s},$$

где M_c^s , M^s – соответственно статический момент при минимальной частоте вращения ротора и момент двигателя при номинальном напряжении питающей сети и минимальной частоте вращения его ротора.

Постоянная времени T_1 для выражения (3) определяется из основного уравнения движения электропривода и механической характеристики АД и определяется для конкретного электропривода. Значение T_1 не превышает пяти периодов сетевого напряжения.

Другая постоянная времени T_2 выбирается в пределах 1-2 значений заданного времени пуска.

Выводы. Предложен аналитический метод для определения время разбега АЭП при использовании в статорных и роторных цепях АД управляющих резисторно-тиристорных модулей.

Установлено, что для обеспечения необходимого диапазона изменения времени пуска малоинерционных электроприводов необходимо регулировать напряжение на обмотках статора АД по сложному закону с двумя постоянными времени: спадающей по экспоненциальному закону и растущей, поэтому же закону. Это необходимо, чтобы переходные электромагнитные моменты АД не превышали допустимые значения.

Показано, что суммарный момент инерции и статический момент АЭП не оказывают существенного влияния на максимальное значение электромагнитного момента, что позволяет выбирать наиболее простые законы управления пуском электропривода и применять в большинстве случаев разомкнутую систему управления. Наибольшее влияние они оказывают на время переходного процесса, частоту колебаний электромагнитного момента и скорость вращения АД, что рекомендуется учитывать при проектировании и внедрении в различные технологические механизмы и агрегаты указанных электроприводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушин В.С., Якимец А.М., Бангула В.Б. Анализ пуска асинхронного двигателя с помощью тиристорного преобразователя напряжения // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – №6. – С. 31-33.
2. Петрушин В.С., Якимец А.М., Єрмолаєв В.В. Сравнительный анализ различных способов пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя // Електромеханіка і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3. – С. 243-246.
3. Фигаро Б.И., Васильев Д.С. Применение устройств плавного пуска и торможения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в электроприводах крановых механизмов передвижения // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – №4. – С. 30-38.
4. Маренич К.М., Руссиян С.А. Патент України на корисну модель №101843. Спосіб управління тиристорним регулятором напруги в пристрої уповільнення пуску асинхронного двигуна. UA МПК (2013.01), H02M 7/00 H02M 1/08 (2006.01), H02J 3/18 (2006.01), H02P 7/00, H02P 5/00, H02M 5/00. Публ. 13.05.2013, Бюл. № 9.
5. Красношарпа Н.Д. Зменшення похибки розрахунку пускових режимів асинхронних електроприводів за статичними характеристиками. // Проблеми інформатизації та управління. – 2011. – №3(35). – С. 62-67.
6. Васильев Д.С. Исследование электромеханических процессов при прямом пуске и торможении асинхронных двигателей с учетом переменных параметров и сравнение их с плавным пуском и торможением // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – №4(63). – Ч.1. – С.43-49.
7. Ковальов В.І. Патент України на корисну модель № 67058. Спосіб формування пускових режимів асинхронного приводу з фазним ротором. UA МПК (2011.01) E21B 4/00, E21B 44/00, Публ. 25.01.2012, Бюл. № 2.
8. Потапенко Є.М., Потапенко Є.Є. Патент України на корисну модель № 53315. Спосіб формування бажаних статорних струмів асинхронного трифазного електродвигуна з короткозамкнутим ротором. UA МПК (2009) H02P 21/00. Публ. 11.10.2010, Бюл. № 19.
9. Маренич К.М., Руссиян С.А. Обґрунтування принципу удосконалення способу уповільнення пуску асинхронного електропривода гірничої машини // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2010. – №84. – С. 160-168.

10. Калинов А.П., Юхименко М.Ю., Исаев С.В. Исследование эффективности формирования пусковых режимов асинхронного двигателя // *Электромеханичні і енергозберігаючі системи*. – 2007. – №2. – С. 15-21.
11. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
12. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. // *Электромеханичні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник*. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
13. Зюзев А.М., Костылев А.В., Степанюк Д.П. Патент РФ № 2497267. Способ плавного пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. МПК H02P1/26, H02P1/28. Оpubл. 27.10.2013, Бюл. № 30.
14. Лобов В.И. Исследование пусковых и тормозных режимов асинхронных электроприводов с тиристорным параметрическим управлением: дис. ... к. техн. наук. – М. ВНИИЭлектропривод, 1983. – 269 с.
15. Бродский Ю.А., Егорова С.А., Лобов В.И., Швец С.А. А.с. СССР №1108589. Способ пуска малонерционного асинхронного электродвигателя, МПК H 02 P 1/26. Оpubл. 15.08.1984. Бюл. № 30. – 4 с.
16. Давиденко А.Г., Лобов В.И., Паришкура Н.Г., Рухленко С.К., Петров П.Е. А.с. СССР №944034. Электропривод переменного тока. МПК H 02 P 3/24, H 02 P 5/28. Оpubл. 15.07.1982. Бюл. №8. – 4 с.
17. Чиликин М.Г. Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 2007. – 576 с.

REFERENCES

1. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Bangula V.B. Analysis of a thyristor voltage converter fed induction motor start. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.6, pp. 31-33. (Rus).
2. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Ermolaev V.V. Comparative analysis of the different ways to start an asynchronous motor shorted. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2012, no.3, pp. 243-246. (Rus).
3. Figaro B.I., Vasilyev D.S. Application of squirrel-cage induction motor soft starting and braking in the electric drives of crane travel mechanisms. *Elektrotehnichni ta kompiuterni systemy – Electrotechnic and computer systems*, 2011, no.4, pp. 30-38. (Rus).
4. Marenich K.M., Russiyan S.A. *Sposib upravlinnia tyrstornym reholiatorom napruhy v prystroi upovilnennia puskuly asynkhronnoho dyvhuna* [Method of the voltage regulator of control device deceleration start induction motor]. Patent UA, no.10184, 2013. (Ukr).
5. Krasnoshapka N.D. Reducing the error calculation starting modes of electric drives for asynchronous static characteristics. *Problemy informatyzatsii ta upravlinnia – Problems of informatization and management*, 2011, no.3(35), pp. 62-67. (Ukr).
6. Vasilyev D.S. Study of electromechanical processes in direct start-up and braking of asynchronous motors with the variables and comparing them with soft start and braking. *Visnyk Kremenchukskoho derzhavnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 2010, no.4(63), part 1, pp. 43-49. (Rus).
7. Kovalev V.I. *Sposib formuvannia puskovykh rezhymiv asynkhronnoho pryvodu z faznym rotorom* [Method of forming starting modes asynchronous drive with slip ring motors]. Patent UA, no.67058, 2012. (Ukr).
8. Potapenko E.M., Potapenko E.E. *Sposib formuvannia bazhanykh statornykh strumiv asynkhronnoho tryfaznoho elektrodyvhuna z korotkozamknеныm rotorom* [Method of forming the desired stator currents phase asynchronous motor with squirrel cage]. Patent UA, no. 53315, 2010. (Ukr).
9. Marenich K.M., Russiyan S.A. Justification principle of improving the method of deceleration start asynchronous electric mining machine. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka – Mining electrical engineering and automation*, 2010, vol.84, pp. 160-168. (Ukr).

10. Kalinov A.P., Yukhimenko M.Y., Isaev S.V. Investigation of the efficiency of formation of an induction motor starting modes. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2007, no.2, pp. 15-21. (Rus).
11. Chernyi A.P., Gladyr A.I., Osadchuk Y.G. *Puskovyie systemy nereguliruemyykh elektroprivodov: Monografiia* [Starting unregulated electric system: Monograph]. Kremenchuk: PP Cherbattyh A.V. Publ., 2006. 280 p. (Rus).
12. Popovich M.G., Lozinsky O.Y., Klepikov V.B. *Elektromekhanichni systemy avtomatichnoho keruvannia ta elektroprivody: Navch. posibnyk* [Electromechanical automatic control system and electric drives: Tutorial]. Kyiv, Lybid Publ., 2005. 680 p. (Ukr).
13. Zyuzev A.M., Kostylev A.V., Stepanjuk D.P. *Sposob plynogo puskuly asynkhronnoho dvigatel'ia s korotkozamknutyim rotorom* [Method of soft start induction motor with squirrel-cage rotor]. Patent Russian Federation, no.2497267, 2013. (Rus).
14. Lobov V.I. *Issledovanie puskovykh i tormoznykh rezhimov asynkhronnykh elektroprivodov s tiristornym parametricheskim upravleniem*. Diss. kand. techn. nauk [Research of starting and braking modes of asynchronous electric drives with thyristor parametric-hydraulic control. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1983. 269 p. (Rus).
15. Brodsky Y.A., Egorova S.A., Lobov V.I., Shvets S.A. *Sposob puskuly maloinertsionnogo asynkhronnogo elektrodvigel'ia* [Method of starting a fast-response induction motor]. USSR Certificate of Authorship, no.1108589, 1984. (Rus).
16. Davidenko A.G., Lobov V.I., Parishkura N.G., Rukhlenko S.K., Petrov P.E. *Elektroprivod peremennogo toka* [AC drive]. USSR Certificate of Authorship, no. 944034, 1982. (Rus).
17. Chilikin M.G., Sandler A.S. *Obshchii kurs elektroprivoda: Uchebnyk dlia vuzov* [General course of the electric drive: Textbook for high schools]. Moscow, Energoizdat Publ., 2007. 576 p. (Rus).

Поступила (received) 20.05.2015

Лобов Вячеслав Иосифович¹, к.т.н.,

Лобова Карина Витальевна¹, студентка,

¹ Государственное высшее учебное заведение «Криворожский Национальный университет», 50027, Кривой Рог, ул. XXII Партсъезда, 11, тел/phone +38 0564 4090635, e-mail: lobov.vjcheslav@yandex.ru

V.I. Lobov¹, K.V. Lobova¹

SIHE «Kryvyi Rih National University», 11, XXII Partz'izdu Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine.

Method of determining the start time of induction motors in the control of resistor-thyristor modules.

Purpose. An electric general-purpose drive with asynchronous motor is proposed. For motor control in stator and rotor, circuits used resistors and thyristors. These elements included together in various ways. This allows to get a variety of power converter circuit with resistor-thyristor modules. **Methodology.** Taking into account the technical requirements for industrial machinery developed an analytical method for determining the run-up controlled induction motor. Formed starting modes by changing the value of the equivalent resistor-thyristor modules. Using logic synthesis and function of thyristors switching to determine the equivalent value of resistor-thyristor modules. **Scientific novelty.** It lies in the fact that the proposed method of calculation to determine the run-up in the limited amount of transient current and torque of the motor. The total moment of inertia and the static moment of the drive do not have a significant impact on the maximum value of the transient electromagnetic torque. Most of these options affect the transition process, the oscillation frequency of the electromagnetic torque and the motor speed. **Practical value.** The method used for calculating allows to select the simplest laws of launch control actuator and apply open-loop control system without increasing the cost of the power converter, so it is of practical importance. References 17, figures 2. **Key words:** induction motor, resistor-thyristor module, start, regulation opening angle of thyristor, moment of inertia, static moment.