

*На підставі отриманої передаочної функції електромагнітної частини асинхронного двигуна виконано синтез розрахунково-аналітичного методу дослідження стійкості розімкнених систем електропривода ТПН-АД. Виконано дослідження стійкості з асинхронними двигунами різної потужності та типовиконання. Показано, що дослідження певних співвідношень електромагнітних та електромеханічних постійних часу електроприводу ТПН-АД, дозволяє прогнозувати можливість виникнення його нестійких режимів роботи*

*Ключові слова: асинхронний двигун, тиристорний перетворювач, розімкнута система, стійкість, передаюча функція*

*На основаних отриманої передаочної функції електромагнітної частини асинхронного двигуна виконано синтез розрахунково-аналітичного методу дослідження стійкості розімкнених систем електропривода ТПН-АД. Виконано дослідження стійкості з асинхронними двигунами різної потужності та типовиконання. Показано, що дослідження певних співвідношень електромагнітних та електромеханічних постійних часу електроприводу ТПН-АД, дозволяє прогнозувати можливість виникнення його нестійких режимів роботи*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь, разомкнутая система, устойчивость, передаточная функция*

УДК 62–83: 621.313.333

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71496

# СИНТЕЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ»

**А. А. Бойко**

Доктор технических наук, доцент, директор  
Институт электромеханики и энергоменеджмента\*

E-mail: dart77@ukr.net

**А. Н. Бесараб**

Кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедры

Кафедра электроснабжения и  
энергетического менеджмента\*

E-mail: al\_besarab@ukr.net

**В. Ф. Семенюк**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра подъемн-транспортного и  
робототехнического оборудования\*

E-mail: svf@ugi.opu.ua

**Е. В. Найдено**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра электромеханических систем  
с компьютерным управлением\*

E-mail: alena2808@ukr.net

\*Одесский национальный политехнический университет  
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

## 1. Введение

Одним из актуальных вопросов исследования динамических режимов работы электропривода (ЭП) «Тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» (ТПН-АД) является исследование его устойчивости. Как известно, в разомкнутых системах электропривода ТПН-АД с синхронизацией с напряжением сети на рабочем участке механических характеристик, в ряде случаев, могут наблюдаться колебания выходных величин. Характер и количественные показатели колебательных процессов весьма различны. Они зависят от множества параметров и факторов, в число которых можно включить: величину угла включения вентилей, параметры АД, моменты нагрузки АД, суммарный момент инерции

электропривода, начальные электромагнитные условия (НЭМУ), начальную скорость АД, схематехническую конструкцию ТПН и систем импульсно-фазового управления (СИФУ), способ синхронизации вентилей ТПН. Вынужденные колебания рассматриваются как крайне отрицательное явление, которое нарушает нормальную работу разомкнутых систем ЭП ТПН АД. Для обеспечения безопасной работы ЭП необходимым условием является поиск и определение областей его безопасной работы. Так же принципиальный интерес представляет возможность частичного или полного устранения колебательных режимов. Это обеспечивает упрощение расчета и настройки замкнутых электромеханических систем, обеспечивает требуемое качество регулирования координат и высокие энергетические показатели.

## 2. Анализ литературы и постановка проблемы

Появление автоколебаний в разомкнутых системах ЭП ТПН-АД, большинством исследователей объясняется наличием положительной обратной связи между углом сдвига тока нагрузки и амплитудой первой гармоники выходного напряжения преобразователя [1–3]. Но так же нелинейностью параметров электропривода. Колебательный процесс можно условно разделить на две категории – режимы «малых» и «больших» колебаний. «Малые» колебания – это незатухающие гармонические колебания выходных параметров асинхронного двигателя при условии, что скорость ротора изменяется в пределах первого квадранта (не превышает синхронную, т. е.  $0 < \omega < \omega_0$ ) [4]. Указывается [5, 6], что физически этот вид автоколебаний связан с обменом энергии между электромагнитными контурами и инерционными маховыми массами электропривода. Характерные графики изменения скорости, момента и тока статора АД в режиме «малых» колебаний представлены на рис. 1.

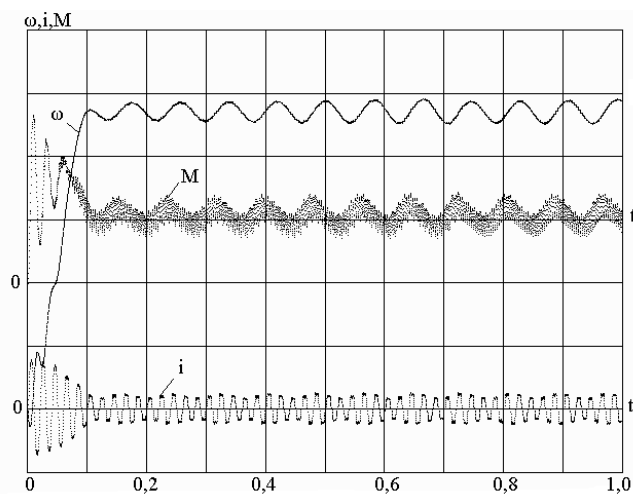


Рис. 1. Графики изменения скорости  $\omega$ , момента  $M$  и тока статора  $i$  АД 4А80В4 в режиме «малых» колебаний;  $\alpha=50$  эл. град.,  $M_c=1,1M_n$ ,  $J_\Sigma=J_{дв}$ . Масштабы:  $m_i=4I_n/\text{дел.}$ ;  $m_M=1M_n/\text{дел.}$ ;  $m_\omega=0,2\omega_0/\text{дел.}$

Вторая категория – это режим больших колебаний (рис. 2) [7]. В данном случае скорость двигателя может превысить синхронную, а область колебаний охватывает первый и второй квадранты. Показательно поведение разомкнутой системы ЭП ТПН-АД в режиме пуска при подходе к синхронной скорости и в области перерегулирования [7]. Если параметры АД и условия пуска создают предпосылки к перерегулированию скорости, то при приближении к подсинхронной скорости фаза тока увеличивается, а выходное напряжение преобразователя благодаря действию внутренней обратной связи повышается [8]. При скорости выше синхронной, когда фаза тока становится больше 90 эл. град., процесс сопровождается практически полным открытием вентилей ТПН, независимо от заданного угла включения [9]. Благодаря электромагнитной инерционности двигатель продолжает оставаться в двигательном режиме при скорости выше синхронной, что способствует усиле-

нию процесса перерегулирования [10]. В результате в ЭП развивается перерегулирование, даже если задана искусственная механическая характеристика с напряжением меньшим номинального. Электропривод может войти в режим больших колебаний с перерегулированием АД по скорости до 40 % и провалами до  $0,5\omega_0$  [4]. Период колебаний включает процесс резкого торможения одним или несколькими импульсами момента до некоторой минимальной скорости и последующий разгон двигателя [5, 11].

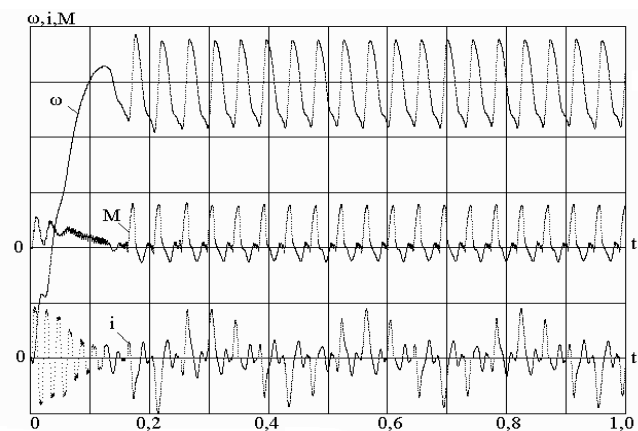


Рис. 2. Графики изменения скорости  $\omega$ , момента  $M$  и тока статора  $i$  АД 4А80В4 в режиме «больших» колебаний;  $\alpha=70$  эл. град.,  $M_c=0,5M_n$ ,  $J_\Sigma=1,5J_{дв}$ . Масштабы:  $m_i=2,5I_n/\text{дел.}$ ;  $m_M=4M_n/\text{дел.}$ ;  $m_\omega=0,2\omega_0/\text{дел.}$

Особенности процессов в режиме больших колебаний позволяют говорить о том, что их возникновение связано не столько с изменением скорости ротора и обменом энергии, сколько с колебательным движением и взаимодействием между собой обобщенных векторов напряжения сети и ЭДС обмоток статора, а также потокоцеплений статора и ротора [2, 4].

Необходимость оценки влияния различных факторов и параметров ЭП на характер колебательных процессов разомкнутой системы электропривода ТПН-АД, в свою очередь, определяет необходимость разработки новых методов исследования ее устойчивости [1–6].

## 3. Цель и задачи исследования

Цель настоящих исследований – разработка численно-аналитического метода исследования и исследование устойчивости разомкнутой системы электропривода «Тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель».

Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

- синтез и применение расчетно-аналитического расчетного метода для исследования устойчивости;
- оценка влияния на устойчивость параметров АД;
- оценка влияния на характер неустойчивых режимов схемотехнических особенностей систем импульсно-фазового управления ТПН;
- формирование нового способа управления ТПН, обеспечивающего отсутствие неустойчивых режимов.

**4. Материалы и методы исследования устойчивости разомкнутой системы электропривода ТПН-АД**

**4.1. Экспериментальная база исследования**

Исследование устойчивости ЭП ТПН-АД выполнялось как путем моделирования, так и при помощи действующих промышленных электроприводов. При моделировании применялась полная модель АД с учетом нелинейности его параметров с последующим моделированием ТПН на основании логических коммутационных функций [10]. При проведении эксперимента использовались электропривод, контрольно-измерительные устройства и другая лабораторная база института электромеханики и энергоменеджмента Одесского национального политехнического университета (Украина), а также предприятий и организаций Одесской области.

**4.2. Расчетно-аналитический метод исследования устойчивости разомкнутой системы электропривода ТПН-АД**

Реальные переходные процессы асинхронного электропривода сопровождаются изменением скорости двигателя. Однако, в ряде случаев, полезно использовать результаты решения системы дифференциальных уравнений асинхронной машины при постоянной скорости ее вращения [11]. Расчетная структурная схема разомкнутой системы ЭП ТПН-АД изображена на рис. 3 [12].

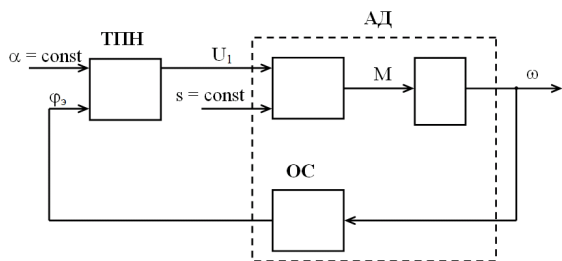


Рис. 3. Расчетная структурная схема разомкнутой системы ЭП ТПН-АД

Характерной особенностью приведенной схемы является применение зависимости фазы тока не от скольжения, а от текущего значения скорости. При таком представлении выходные сигналы всех звеньев имеют прямую зависимость от входных сигналов, а внутренний контур системы представляет положительную обратную связь. При математическом описании элементов структурной схемы выполняется учет их нелинейных свойств [13].

Асинхронный двигатель изображается тремя звеньями с передаточными функциями, которые обозначаются [14]:  $H_{эм}(p)$  – передаточная функция электромагнитной части АД;  $H_{м}(p) = \frac{1}{J_{\Sigma} p}$  – передаточная функция электромеханической части ЭП;  $H_{ос}(p) = K_{\phi} \frac{\Delta\phi_e}{\Delta\omega}$  – передаточная функция звена внутренней обратной связи, по углу нагрузки.

Тиристорный преобразователь представлен усиленным звеном с коэффициентом усиления  $K_{тпн}$ , который при переходе к приращениям определяется [14]:

$$K_{тпн} = \frac{\Delta U_1}{\Delta \phi_s}, \tag{1}$$

в точке, определяемой углом управления  $\alpha$  и скольжением  $s$ .

Существенная нелинейность, вводимая вентилями, учитывается за счет аппроксимации выходного напряжения ТПН. Уравнения амплитуды напряжения первой гармоники  $U_1$ , полученные в процессе идентификации, имеют вид [13]:

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= -0,1291 + 0,06165 \cdot \phi_s - 7,2407 \cdot 10^{-4} \cdot \phi_s^2, \\ A_1 &= -0,02723 - 0,0015212 \cdot \phi_s + 2,038 \cdot 10^{-5} \cdot \phi_s^2, \\ A_2 &= -2,1534 \cdot 10^{-4} + 8,2836 \cdot 10^{-6} \cdot \phi_s - 1,1941 \cdot 10^{-7} \cdot \phi_s^2, \\ U_1 &= A_0 + A_1 \cdot \alpha + A_2 \cdot \alpha^2, \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

с учетом рекомендуемых ограничений:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= 1 \quad \forall \alpha \leq \phi_s, \\ U_1 &= 1 \quad \forall U_1 > 1, \\ U_1 &= 0 \quad \forall U_1 < 1. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Фаза тока определяется по эквивалентным значениям активных и реактивных составляющих сопротивлений схемы замещения АД [14]:

$$\phi_s = \arctg \frac{x_s}{r_s}, \tag{4}$$

где  $x_s$ ,  $r_s$  – эквивалентные сопротивления асинхронного двигателя для Т-образной схемы замещения, которые определяются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} r_s &= r_1 + \frac{x_0^2 r_2' / s}{(x_2' + x_0)^2 + (r_2' / s)^2}; \\ x_s &= x_1 + x_0 - \frac{x_0^2 (x_2' + x_0)}{(x_2' + x_0)^2 + (r_2' / s)^2}. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

Звено, характеризующее электромагнитную часть АД, описывается на основании аналитического выражения, определяющего переходную составляющую электромагнитного момента как реакцию на скачок входного напряжения [12]:

$$M_{эм} = \sum_{i=1}^9 M_i. \tag{6}$$

Это выражение содержит девять составляющих, из которых первая – это установившееся значение момента, две – экспоненциальные, три – косинусные и три – синусные составляющие [15]:

$$\left. \begin{aligned} M_1(t) &= M_c; \quad M_2(t) = A_2 e^{-\frac{t}{T_2}}; \quad M_3(t) = A_3 e^{-\frac{t}{T_3}}; \\ M_4(t) &= A_4 e^{-\frac{t}{T_4}} \cos \Omega_4 t; \quad M_5(t) = A_5 e^{-\frac{t}{T_5}} \cos \Omega_5 t; \\ M_6(t) &= A_6 e^{-\frac{t}{T_6}} \cos \Omega_6 t; \quad M_7(t) = A_7 e^{-\frac{t}{T_7}} \sin \Omega_7 t; \\ M_8(t) &= A_8 e^{-\frac{t}{T_8}} \sin \Omega_8 t; \quad M_9(t) = A_9 e^{-\frac{t}{T_9}} \sin \Omega_9 t. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

Амплитуды  $A_i$ , частоты свободных колебаний  $\Omega_i$  и постоянные времени затухания  $T_i$  экспоненциальных

Таблица 1

Параметры составляющих переходного момента при включении асинхронных двигателей при нулевых НЭМУ с постоянным скольжением  $s=s_n$

Составляющая момента	Характеризующие параметры	Тип двигателя				
		4A80A6 0,75 кВт	4A100L4 4 кВт	4A132M4 11 кВт	4A355S4 250 кВт	
M1	Постоянная	Муст	0,992	1,019	1,007	0,836
M2	Экспонента	A2 T2	-9,194 4,75	-2,64 6,60	-1,287 10,6	-0,323 26,8
M3	Экспонента	A3 T3	-6,257 2,76	-2,25 5,02	-1,055 7,82	-0,297 26,5
M4	Косинусоида	A4(0)	1,946	-0,63	-0,775	-0,81
		A4(max)	1,946	-0,63	-0,775	-0,81
		T4	9,51	13,2	21,2	53,6
		$\Omega_4$	0,311	0,126	0,058	0,996
M5	Косинусоида	A5(0)	-3,928	-1,409	-1,239	-0,861
		A5(max)	-3,928	-1,409	-1,239	-0,861
		T5	5,52	10,03	15,65	53,04
		$\Omega_5$	0,773	0,92	0,969	0,0134
M6	Косинусоида	A6(0)	16,44	5,915	3,349	1,456
		A6(max)	16,44	5,915	3,349	1,456
		T6	3,49	5,7	9,00	26,66
		$\Omega_6$	-0,461	-0,794	-0,911	0,983
M7	Синусоида	A7(0)	0	0	0	0
		A7(max)	-5,792	-6,29	-5,68	5,05
		T7	9,51	13,2	21,2	53,59
		$\Omega_7$	0,311	0,126	0,058	0,996
M8	Синусоида	A8(0)	0	0	0	0
		A8(max)	5,792	6,29	5,68	-5,05
		T8	5,52	10,03	15,65	53,04
		$\Omega_8$	0,773	0,92	0,969	0,0134
M9	Синусоида	A9(0)	0	0	0	0
		A9(max)	5,792	6,29	5,68	-5,05
		T9	3,49	5,70	9,00	26,66
		$\Omega_9$	-0,461	-0,79	-0,911	0,983
Параметры Г-образной схемы замещения АД в отн. единицах		X <sub>0</sub>	1,50	2,400	3,200	4,600
		R' <sub>1</sub>	0,16	0,067	0,043	0,013
		X' <sub>1</sub>	0,12	0,079	0,085	0,090
		R'' <sub>2</sub>	0,12	0,053	0,032	0,013
		X'' <sub>2</sub>	0,20	0,140	0,130	0,130

и периодических составляющих зависят от параметров двигателя, значений скольжений ротора и характеризуются двумя коэффициентами затухания ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) и двумя базовыми частотами колебаний ( $\omega_1, \omega_2$ ), которые, в свою очередь, зависят от параметров АД [13].

Переходные составляющие момента, зависят от скорости, при которой происходит включение двигателя. При скольжениях, близких к единице, сумма переходных составляющих представляет собой сравнительно медленно затухающие колебания, а при скольжениях меньше критического, и особенно вблизи синхронной скорости, происходит быстрое затухание и периодические составляющие выражены слабо. На рис. 4 представлены на интервале времени 0,03 с все девять составляющих, а в табл. 1 параметры, их характеризующие для двигателей четырех габаритов.

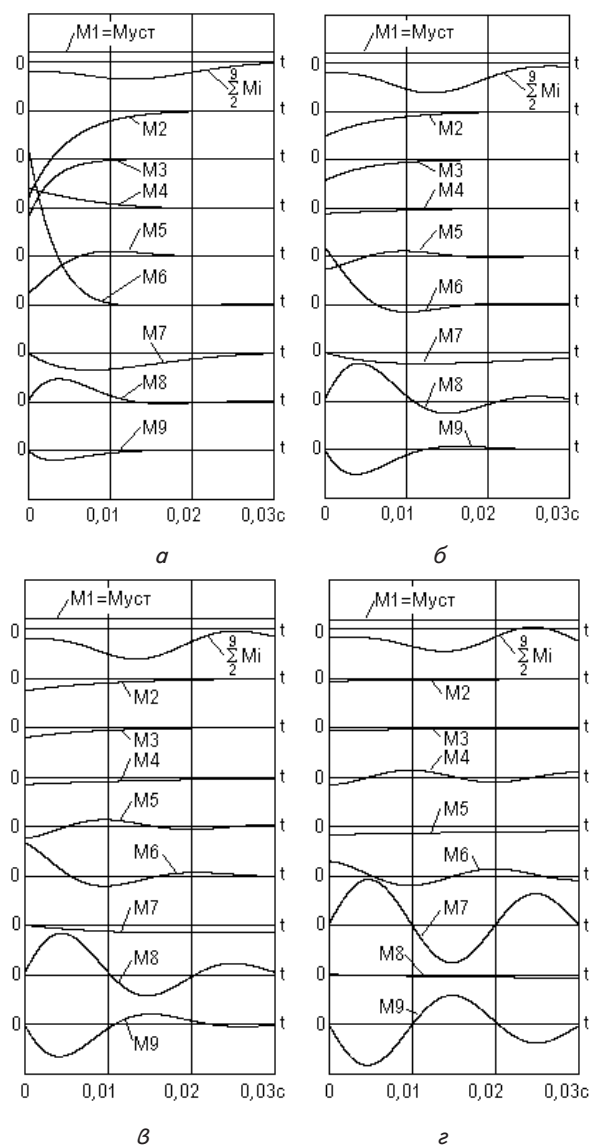


Рис. 4. Графики составляющих электромагнитного момента АД при подключении с нулевыми НЭМУ при постоянном скольжении  $s=s_n$ . Масштаб моментов  $5M_n/\text{дел}$ .  
 а – 4A80A6, 0,75 кВт; б – 4A100L 4, 4 кВт;  
 в – 4A132M4, 11кВт; г – 4A355S4, 250 кВт

При анализе принимается, что параметры двигателя остаются постоянными. Параметры Г-образной схемы замещения обозначены в конце табл. 1 [16]. Для экспоненциальных составляющих приведены начальные амплитуды и постоянные времени затухания. Для гармонических составляющих приведены начальные  $A(0)$  и амплитудные  $A(\max)$ , без учета затухания значения, а также постоянные времена затухания и частоты свободных колебаний. Амплитуды и частоты приведены в относительных единицах, где за базу приняты номинальный момент и синхронная частота вращения. По рис. 4. можно проследить “эволюцию” отдельных составляющих переходного момента в зависимости от параметров двигателя. При обращении к двигателям малой или большой мощности подразумевается, что с увеличением мощности возрастает жесткость механических характеристик, уменьшается активное сопротивление обмоток статора и ротора, увеличивается



электромагнитная инерционность, уменьшается ток намагничивания. В рассматриваемых примерах с увеличением мощности все постоянные времени увеличиваются. Амплитуды экспоненциальных и косинусных составляющих более выражены у двигателей меньшей мощности. С ростом мощности они значительно уменьшаются. Синусные составляющие, наоборот, более сильно проявляются с ростом мощности двигателя. При больших амплитудах отдельных синусных и косинусных составляющих их суммарный эффект может оказаться не столь значительным, поскольку, чаще всего одноименные составляющие с большими амплитудами находятся попарно в противофазе. Можно отметить, что для двигателей небольшой мощности при достаточно больших значениях отдельных свободных составляющих суммарный переходный момент, обозначенный как сумма от 2-й до 9-й составляющих, выглядит намного скромнее. Для двигателей большой мощности суммарный переходный момент сопоставим по величине практически со всеми составляющими. Физический смысл отрицательных частот для 6-х и 9-х составляющих состоит в изменении направления вращения этих составляющих электромагнитного момента [17]. На графиках это выражается в том, что прямо- и обратнорвращающиеся составляющие находятся в противофазе. Постоянная времени затухания у всех двигателей оказывается меньше периода колебаний низкочастотных составляющих, и поэтому такие составляющие вырождаются и мало накладывают гармонические колебания. У маломощного двигателя этот эффект проявляется даже для высокочастотных составляющих момента, когда косинусные составляющие М4, М5, М6, рис. 4, а более походят на экспоненты, чем на косинусоиды. Специфическое сочетание различных постоянных времени у отдельных составляющих моментов приводит к тому, что у мощных двигателей практически при всех скольжениях колебания длятся дольше и сопровождаются предварительным нарастанием момента в течение нескольких периодов с последующим спаданием. У маломощных двигателей переходный момент начинает спадать сразу.

#### 4.3. Результаты исследования устойчивости разомкнутой системы ЭП ТПН-АД

Аналитическое решение вопроса устойчивости предполагает аппроксимацию реального звена  $H_{AD}(p)$  сочетанием некоторых элементарных звеньев, обеспечивающих максимальное приближение динамических свойств к свойствам реального объекта. С одной стороны, аппроксимирующие функции не должны быть высокого порядка, чтобы сохранить возможность аналитического решения. С другой стороны, учитывая большое количество составляющих, трудно ожидать аппроксимации простой, и с высокой точностью. Большая разница в форме составляющих и различное их долевое участие в переходном моменте у двигателей разной мощности обуславливает то, что аппроксимирующие функции также могут быть различными и требуется "индивидуальный" подход к отдельным группам двигателей. На рис. 5 представлены те же моменты, что и на рис. 4, но объединенные в группы по функциональному виду. Графики М2,3 представляют сумму экспоненциальных моментов, графики М4,5,6-сумму косинусоидальных, а М7,8,9-синусоидальных состав-

ляющих. Графики М4-9 представляют сумму всех гармонических составляющих. Анализируя формы графиков моментов, изображенных на рис. 5, можно заключить, что для маломощных и других двигателей с быстрым затуханием и нечетко выраженными гармоническими составляющими переходного момента наиболее подходящими аппроксимирующими функциями являются экспоненты, эквивалентные группам М2,3 и М4-9. Для двигателей рассматриваемых условно средних мощностей, 4 и 11 кВт, более характерной аппроксимирующей функцией является затухающая косинусоида М4-9 в сочетании с экспонентой М2,3. Для двигателя, мощностью 250 кВт точность аппроксимации с помощью 2-3 элементарных звеньев недостаточна, так как оказываются значимыми практически все составляющие электромагнитного момента. Каждое из принятых при аппроксимации элементарных звеньев описывается некоторыми эквивалентными параметрами, дающими наибольшее приближение к желаемому виду переходной характеристики.

Например, для двигателя 4А100L4 мощностью 4 кВт лучшее приближение к переходной характеристике дают функции затухающей косинусоиды и спадающей экспоненты. Передаточная функция электромагнитной части двигателя соответствует изображению по Лапласу этих функций:

$$H(p) = \frac{A_1 p^2 + \frac{A_1}{T_1} p}{p^2 + \frac{2}{T_1} p + \left( \frac{1}{T_1^2} + \omega^2 \right)} + \frac{A_2 T_2 p}{T_2 p + 1}. \quad (8)$$

Передаточная функция разомкнутой системы электропривода ТПН-АД [17]:

$$H_p(p) = \frac{K_m \cdot H_{эм}(p)}{J_s p}. \quad (9)$$

Передаточная функция замкнутой системы ЭП:

$$H_s(p) = \frac{H_p(p)}{1 - H_p(p) \cdot K_\phi}. \quad (10)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы ЭП:

$$p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (11)$$

где

$$a_2 = \frac{2}{T_1} + \frac{1}{T_2} - \frac{k_m k_\phi}{J} (A_1 + A_2),$$

$$a_1 = \frac{1}{T_1^2} + \omega_1^2 + \frac{2}{T_1 T_2} - \frac{k_m k_\phi}{J} \left( \frac{A_1}{T_2} + \frac{1}{T_1} (A_1 + 2A_2) \right),$$

$$a_0 = \frac{1}{T_1^2 T_2} + \frac{\omega_1^2}{T_2} - \frac{k_m k_\phi}{J} \left( \frac{A_1}{T_1 T_2} + A_2 \left( \frac{1}{T_1^2} + \omega_1^2 \right) \right).$$

При выборе эквивалентных параметров используются данные табл. 1, а для определения частоты косинусной составляющей учитывается особенность формы переходного момента. А именно, во всем диапазоне рассматриваемых моментов и скольжений (в области  $0 < s < s_{к}$ ), независимо от параметров АД, экстремум

переходного момента наступает всегда примерно при одном и том же времени  $t_{max} \approx 0,0135$  с [18]. Учитывая, что важно “попадание” амплитуды аппроксимирующей функции именно в этот первый и главный пик момента, эквивалентная частота для косинусоиды будет составлять для всех случаев  $\pi / t_{max}$  или  $\omega_{13} \approx 232$  с<sup>-1</sup>. Эквивалентная амплитуда косинусоиды составляющей определяется суммой начальных амплитуд 4, 5 и 6 составляющих переходного момента, то есть  $A_{13} = A_4(0) + A_5(0) + A_6(0)$ . Постоянная времени принимается по средней из трех постоянных времени косинусоидальных составляющих, а именно наибольшей  $T_{13} = T_4$ . Параметры эквивалентной экспоненты определяются суммой амплитуд экспонент M2 и M3 ( $A_{23} = A_2 + A_3$ ) и максимальной постоянной  $T_{23} = T_2$ .

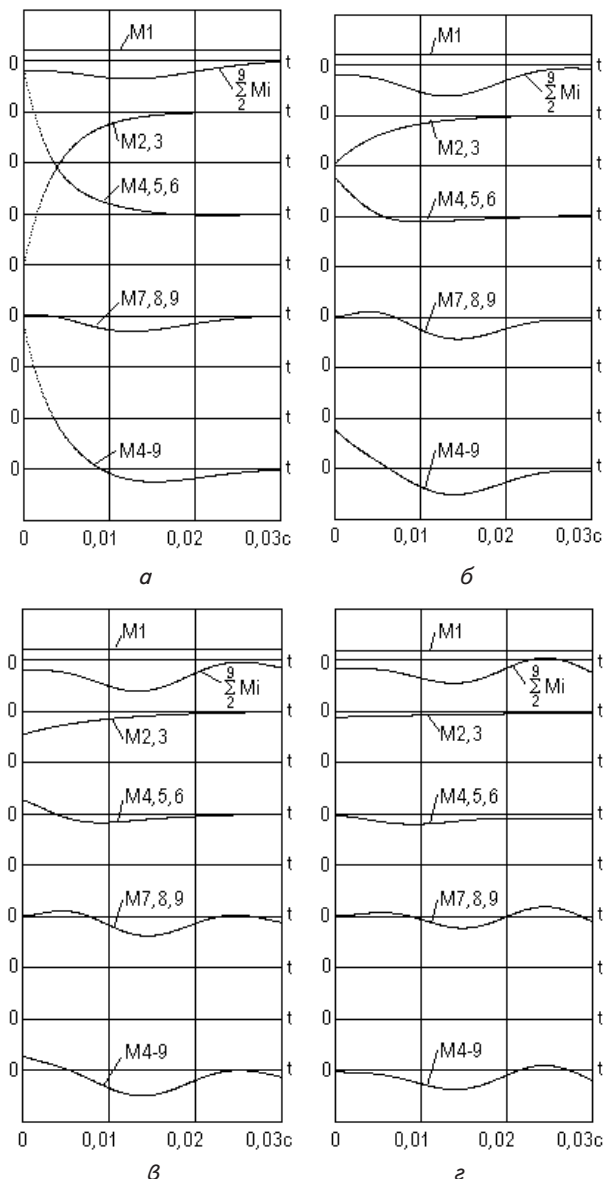


Рис. 5. Графики эквивалентных составляющих электромагнитного момента АД при подключении с нулевыми НЭМУ при постоянном скольжении  $s = s_{н.}$ . Масштаб моментов  $5M_{н.}/\text{дел}$ : а – 4А80А6, 0,75 кВт; б – 4А100L 4, 4 кВт; в – 4А132М4, 11кВт; г – 4А355S4, 250 кВт

При исследовании устойчивости, при известном моменте инерции ЭП, определяются условия устойчивости в заданной области скольжений и моментов. Такой подход более соответствует возможностям численных методов интегрирования [15]. В данном случае принимается наихудший случай, когда коэффициент инерции равен единице, так как заведомо известно, что с увеличением момента инерции область неустойчивой работы уменьшается [12]. Область скольжений ограничивается трех-, четырехкратным значением относительно номинального и в заданной области формируется семейство механических характеристик. Сканируя эту область с заданным шагом по  $\alpha$  и  $s$ , определяются точки устойчивой или неустойчивой работы ЭП ТПН-АД. Устойчивой считается рабочая точка, в которой все коэффициенты характеристического уравнения (11) положительны и для которого выполняется критерий устойчивости Гурвица [14].

На рис. 6 представлено семейство механических характеристик с результатами анализа устойчивости. Область неустойчивой работы, определенная теоретически с помощью критерия Гурвица, обозначена жирными линиями, а устойчивой – тонкими. Здесь же обозначена граница между устойчивым и неустойчивым режимами, найденная по результатам моделирования режима включения с заданным углом и моментом нагрузки [18]. Эта граница проверялась путем проведения экспериментов и с помощью математической модели ЭП ТПН-АД [19].

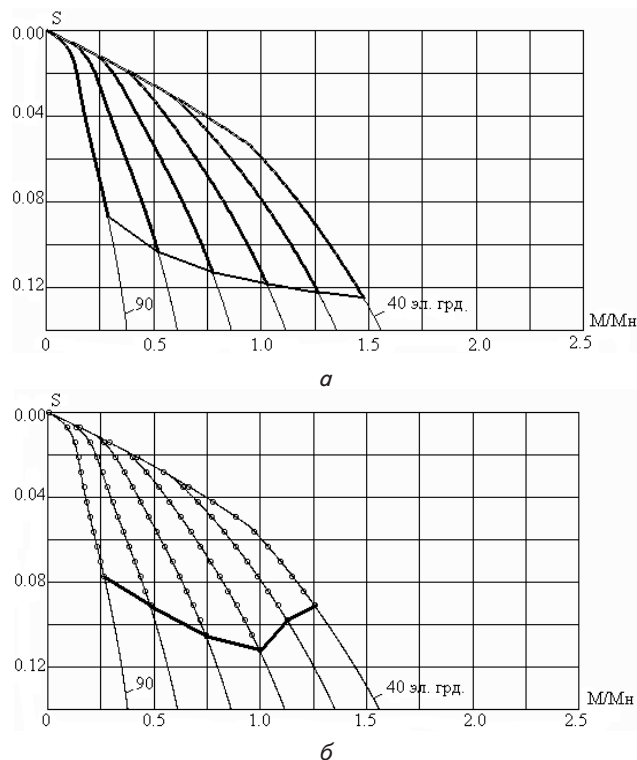


Рис. 6. Семейства механических характеристик с определенными зонами неустойчивой работы по расчетному аналитическому методу (а) и при помощи математической и физической моделей АД ЭП ТПН-АД (б) для двигателя 4А100L4

Анализ устойчивости позволил выявить некоторые ранее неизвестные особенности. Так, при небольших

углах включения 40...50 эл.град. область неустойчивой работы ограничена, так как проявления неустойчивости возможны только в том диапазоне нагрузок, где угол включения вентиля больше фазы тока статора [19]. При уменьшении угла включения до 30 эл. град, например для анализируемого асинхронного двигателя, существует единственная точка неустойчивой работы при  $M_c=1,45M_n$ . При углах включения вентиля 50< $\alpha$ <100 эл. град. область неустойчивой работы начинается от  $M=0$  до некоторого граничного значения момента нагрузки, при превышении которого двигатель начинает работать устойчиво.

**4. 4. Оценка влияния на устойчивость параметров АД**

Как уже подчеркивалось, при увеличении суммарного момента инерции системы область устойчивой работы увеличивается и наоборот [13, 20]. Рассматривая семейство четырехполюсных электродвигателей серии 4А обычного исполнения мощностью 0,25...250 кВт [16], следует отметить, что для ТПН-АД с двигателем 4А355S4, 250 кВт не удалось выявить ни одной точки, где существуют автоколебания. С уменьшением мощностей асинхронных двигателей, и, как следствие, их моментов инерции, появляется и увеличивается зона неустойчивой работы (рис. 7, 8). Это фиксируется для АД мощностью 1,5 кВт и более. При исследовании ТПН АД с электродвигателями мощностью менее 1,5 кВт наблюдается обратная картина – зона неустойчивой работы уменьшается с уменьшением мощностей АД, а для электродвигателя 4АА63А4, 0,25 кВт (так же как и для 4А355S4) она вовсе отсутствует (рис. 8, б).

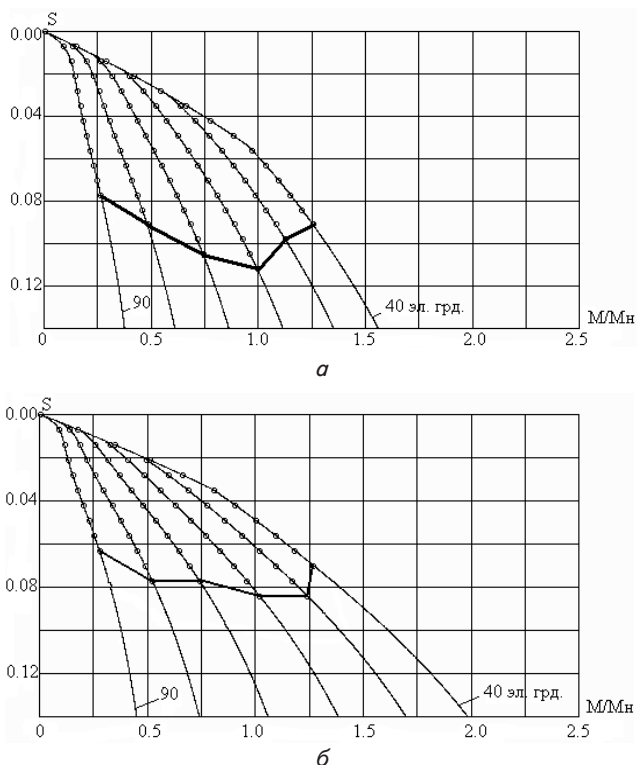


Рис. 7. Семейства механических характеристик с определенными зонами неустойчивой работы для двигателей: а – 4А100L4; б – 4А132М4

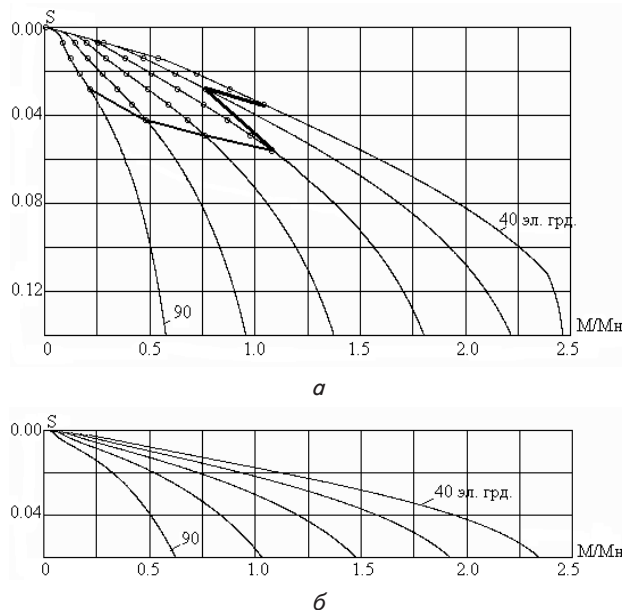


Рис. 8. Семейства механических характеристик с определенными зонами неустойчивой работы для двигателей: а – 4А200L4; б – 4А355S4

Это явление может быть объяснено тем, что в действительности, устойчивость системы определяется не абсолютным значением суммарного момента инерции ЭП, а влиянием его относительной величины на характер переходного процесса АД [21]. Это влияние может быть выражено отношением электромеханической постоянной времени  $T_m$  к электромагнитной постоянной времени четвертой переходной составляющей электромагнитного момента –  $T_4$ .

При линеаризации механической характеристики в области  $0 < s < s_n$ , электромеханическая постоянная времени может быть найдена [17]:

$$T_m = J_{\Sigma} \frac{1}{|\beta|} \approx J_{\Sigma} \frac{\Delta\omega_n}{\Delta M_n} \approx J_{\Sigma} \frac{\omega_0(1-s_n)}{M_n}, \tag{12}$$

где  $J_{\Sigma}$  – суммарный приведенный момент инерции ЭП, кг\*м<sup>2</sup>.

В табл. 2 приведены значения  $T_m, T_4$  и их отношения  $T_m/T_4$  для семейства асинхронных двигателей исследуемой серии. Результаты анализа показывают, что существует связь между значениями отношения  $T_m/T_4$  и величиной зон неустойчивой работы. Чем больше отношение  $T_m/T_4$ , тем меньше вероятность возникновения автоколебаний в разомкнутой системе ЭП ТПН-АД, при применении данных типов двигателей. В то же время этот вывод не дает право утверждать, что при достаточно близких или одинаковых значениях отношений для некоторых типов двигателей (например, 4А180М4 и 4А71А4) зоны неустойчивой работы будут идентичны.

Возможен пример обратного анализа, когда отношение  $T_m/T_4$  изменяется не за счет изменения габаритов двигателя, а за счет изменения суммарного момента инерции электропривода при применении одного и того же АД. Например, при применении двигателя 4А100L4 с суммарным моментом инерции электропривода  $J_{\Sigma}=2J_{дв}$ , отношение  $T_m/T_4$  увеличивается до 7,12, при этом и область неустойчивой работы существен-

но уменьшается. Это иллюстрируют механические характеристики АД, приведенные на рис. 7, а и рис. 8, соответственно. Приведенный анализ был выполнен, а выводы подтверждены для ряда семейств асинхронных двигателей серии 4А и 5А (IP44, IP23) с числом пар полюсов  $p=2,3$  и 4.

Таблица 2  
 Параметры постоянных времени и их отношений для ряда АД серии 4А

№	Типоразмер АД	Номинальные мощности, кВт	$T_m, c$	$T_4, c$	$T_m/T_4$
1	4A355S4	250	0,58	0,0535	10,8
2	4A280M4	132	0,446	0,0464	9,61
3	4A250S4	75	0,32	0,0452	7,08
4	4A200L4	45	0,24	0,0418	5,74
5	4A180M4	30	0,182	0,0336	5,42
6	4A132M4	11	0,085	0,0214	3,97
7	4A132M4	7,5	0,087	0,0217	4,01
8	4A100L4	4	0,062	0,0174	3,56
9	4A80B4	1,5	0,048	0,0133	3,61
10	4A80A4	1,1	0,064	0,0132	4,85
11	4A71B4	0,75	0,039	0,0083	4,70
12	4A71A4	0,55	0,051	0,0093	5,48
13	4AA63B4	0,37	0,077	0,0119	6,47
14	4AA63A4	0,25	0,1	0,0110	9,09

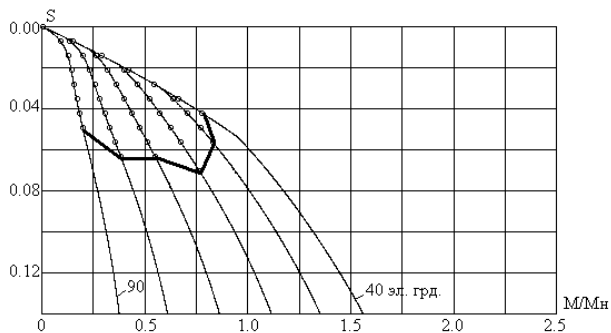


Рис. 9. Механические характеристики с указанием зоны неустойчивой работы ТПН-АД с двигателем 4А100L4 суммарным моментом инерции  $J_{\Sigma}=2 J_{дв}$

**4. 5. Оценка влияния на характер неустойчивых режимов схмотехнических особенностей СИФУ**

Характер процессов, протекающих в неустойчивых режимах ТПН-АД, может зависеть от схмотехнических решений, принятых при разработке СИФУ и выходных каскадов ТПН. Чаще всего СИФУ ТПН с синхронизацией с напряжением сети выполняются по “вертикальному” принципу и имеют 6 отдельных каналов синхронизации, 6 СИФУ и 6 отдельных, по числу тиристоров, формирователей импульсов или выходных каскадов [22]. Условно эта система может быть обозначена как СИФУ-6. В ней существует строгая очередность включения вентилях не только по состоянию силовых анодных цепей вентилях, но и по алгоритму работы самой СИФУ. В некоторых случаях, ради упрощения и экономии, применяют трехканальные СИФУ и, что важно в данном случае, двохвенные формирователи импульсов. Каждый из таких формирователей имеет два выходных канала, например

выходной трансформатор с двумя вторичными обмотками, и подает импульсы управления одновременно на два, включенных встречно-параллельно, тиристора (это СИФУ-3) [22]. При нормальных условиях включается тот тиристор, на аноде которого существует положительное напряжение, очередность коммутации не нарушается и особенности данной схемы не проявляются. В нормальных условиях фазный ток в каждом полупериоде заканчивается за пределами соответствующего полупериода напряжения. Это явление связано с индуктивным характером тока и описывается углом запаздывания окончания тока. В режиме колебаний наблюдаются резкие изменения фазы тока, так что в одной из фаз он может закончиться или, что то же, – изменить свой знак до окончания полупериода напряжения [24]. В СИФУ-6 этого не произойдет, так как на этом тиристоре отсутствуют сигналы управления и на этом особенность процесса прекратится. В ТПН с СИФУ-3 параллельный тиристор имеет возможность включиться, поскольку на управляющий переход подан ток управления. Таким образом, происходит срыв нормальной коммутации вентилях и регулирования напряжения, так как параллельный вентиль включается не просто с углом  $\alpha=0$ , а намного раньше, еще в предыдущем полупериоде. Импульс тока в этом тиристоре становится аномально широким и может доходить до  $2\pi$  и более. За время существования такой ширины обобщенный вектор тока отстает от вектора напряжения на один оборот. Такое явление можно назвать опрокидыванием фазы тока. Графики тока, полученные экспериментально, приведены на рис. 10 [20]. На расчетной осциллограмме случаи аномального увеличения фазы тока выделены окружностями.

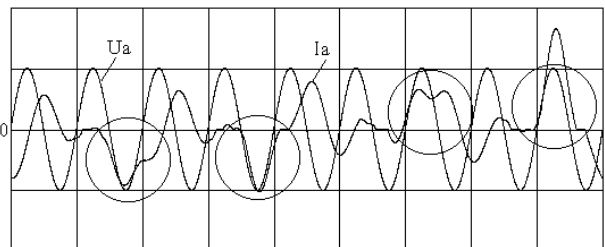


Рис. 10. Осциллограммы фазного тока асинхронного двигателя 4А100М4, 3 кВт в режиме колебаний для случая СИФУ-3 с углом включения  $\alpha=83$  эл. град.;  $M_c=0,01M_n$ ;  $J=1,05J_{дв}$

Следствием «опрокидывания» фазы тока и срыва коммутации является формирование положительного импульса момента, обеспечивающего большое ускорение и быстрый переход во второй квадрант. После восстановления коммутации начинается столь же интенсивное торможение и период колебаний повторяется. Частота таких колебаний в несколько раз больше, чем в режиме колебаний с СИФУ-6, рассмотренном выше. Экспериментальные осциллограммы режима колебаний в электроприводе ТПН-АД с СИФУ-3 приведены на рис. 11.

Реальные системы ЭП с СИФУ-3 и СИФУ-6, дающие разные картины режима колебаний, имеют свои аналоги среди математических моделей электропривода ТПН-АД. Экспериментальные осциллограммы



режима колебаний в системах с СИФУ-6 соответствуют осциллограммам, полученным на точной модели с учетом коммутации вентилей [8]. Экспериментальные осциллограммы с СИФУ-3 соответствуют осциллограммам, полученным на упрощенных идеализированных моделях, в которых питание АД осуществляется от полигармонического источника (дающего нужное напряжение, но не содержащего физических нелинейностей, свойственных тиристорам). К этому же идеализированному случаю можно отнести и модели математического описания линейризованного привода, применяемые при исследованиях устойчивости [18]. Отсюда следует вывод о том, что режим колебаний без срывов коммутации, как это имеет место в ЭП с СИФУ-6, не может быть принципиально описан аналитически, поскольку даже после преодоления трудностей линейризации параметров и характеристик АД и ТПН формируется вариант колебаний по сценарию ТПН-АД с СИФУ-3.

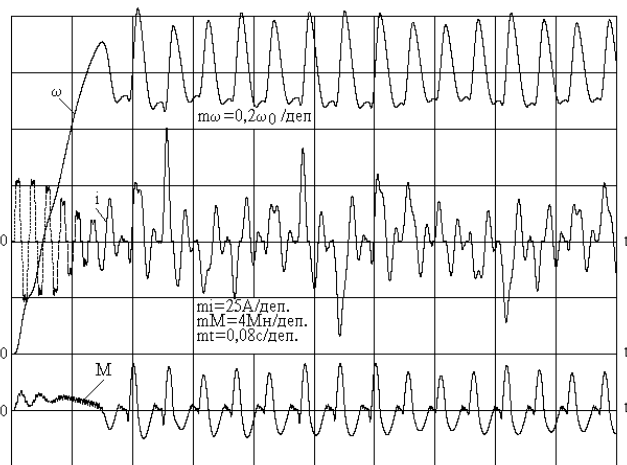


Рис. 11. Осциллограмма переходного процесса пуска и режима колебаний АД 4А100М4, 3 кВт с углом включения  $\alpha=83$  эл. град.;  $M_c=0,01M_n$ ;  $J=1,05J_{дв}$  для случая СИФУ-3

#### 4. 6. Способ формирования выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки

Выходное напряжение трехфазного ТПН является сложной функцией управляющего воздействия – угла включения вентилей  $\alpha$  и возмущающего воздействия – эквивалентной фазы тока статора  $\phi_{\Sigma}$  асинхронного двигателя [5]. Фаза тока АД непостоянна и зависит от параметров схемы замещения и текущего скольжения. Особенно значительные изменения фазы происходят на рабочем участке механической характеристики, от  $\phi_{\Sigma} \approx 90$  эл. град. при холостом ходе, до минимального значения  $\phi_{\Sigma}$  вблизи точки номинального режима. Например при управляющем воздействии  $\alpha=90$  эл. град. первая гармоника выходного напряжения  $U_{1ТПН}$  изменяется от  $U_N$  при  $\phi_{\Sigma}=90$  эл. град. до  $0,22U_N$  при  $\phi_{\Sigma}=30$  эл. град. Поэтому особенностью семейства механических характеристик АД, построенных при различных значениях  $\alpha=const$ , является схожесть общей формы, но не соответствие характеристикам, построенным при  $U=const$  [24]. Второй особенностью, влияющей на устойчивость работы АД, является пропорциональная зависимость выходного напряжения от фазы тока. Эту зависимость следует рассматривать как внутрен-

нюю положительную обратную связь между  $U_{1ТПН}$  и  $\phi_{\Sigma}$ . Если рассмотреть действие этой обратной связи на примере наброса и сброса нагрузки на валу АД (при постоянном значении управляющего воздействия), то при работе вхолостую, когда  $\phi_{\Sigma} \rightarrow 90$  эл. град, к обмотке статора приложено полное напряжение сети. При набросе нагрузки  $M_c=0,5M_n$  начинается уменьшение скорости и  $\phi_{\Sigma}$  начинает уменьшаться. При  $\phi_{\Sigma}=60$  эл. град имеем на выходе ТПН напряжение  $U_{1ТПН}=0,52-0,3U_N$ , при  $\phi_{\Sigma}=30$  эл. град  $U_{1ТПН}=0,34-0,22U_N$ . Глубокое падение выходного напряжения ТПН вызывает уменьшение электромагнитного момента. Наоборот, при сбросе нагрузки происходит обратный процесс, и напряжение на обмотке статора вновь восстанавливается до номинального [7]. Таким образом, внутренняя положительная обратная связь вызывает реакцию АД на изменения нагрузки на его валу. Это свойство может привести к неустойчивым, колебательным режимам, разомкнутой системы ЭП ТПН-АД, как уже было проанализировано, при углах управления  $\alpha=50-90$  эл. град., неполной нагрузке двигателя и при небольших приведенных моментах инерции механизма.

Можно предложить способ компенсации действия этой внутренней положительной обратной связи. Задачу можно сформулировать следующим образом: система управления должна обеспечить пропорциональную зависимость между напряжением управления  $U_{\alpha}$  и выходным напряжением ТПН, при этом действие внутренней обратной связи автоматически компенсируется соответствующими изменениями текущего угла управления  $\alpha$ . Это возможно, если использовать известную приближенную аналитическую зависимость  $U_{1ТПН}=f(\alpha, \phi_{\Sigma})$  [24]. Данную зависимость необходимо преобразовать к виду  $\alpha=f(U_{1ТПН}, \phi_{\Sigma})$ , где управляющим воздействием становится  $U_{1ТПН}$ , возмущающим по-прежнему остается  $\phi_{\Sigma}$ , а угол включения вентилей  $\alpha$  автоматически вычисляется для поддержания заданного напряжения, независимо от текущей фазы тока статора АД:

$$\alpha = \frac{-A_1 - \sqrt{A_1^2 - 4A_2(A_0 - U)}}{2A_2}, \tag{13}$$

где

$$A_0 = -0.1291 + 0.06165 \cdot \phi_{\Sigma} - 7.2407E-04 \cdot \phi_{\Sigma}^2,$$

$$A_1 = 0.02723 - 0.0015212 \cdot \phi_{\Sigma} + 2.038E-05 \cdot \phi_{\Sigma}^2,$$

$$A_2 = -2.1534E-04 + 8.2836E-06 \cdot \phi_{\Sigma} - 1.1941E-07 \cdot \phi_{\Sigma}^2.$$

На рис. 12 в качестве иллюстрации приведены две экспериментальные осциллограммы процессов пуска, наброса и сброса нагрузки при управлении ЭП ТПН-АД по управляющему воздействию  $\alpha=const$  (а) и  $U_{1ТПН}=const$  (б).

В первом случае по окончании процесса пуска возникают характерные незатухающие колебания, при набросе нагрузки  $M_c=M_n$  колебания затухают, однако процесс наброса сопровождается провалом скорости на 35 %. При сбросе нагрузки вновь возникают колебания. Во втором случае провал скорости при набросе нагрузки уменьшается до 15 %, незатухающие колебания не возникают.

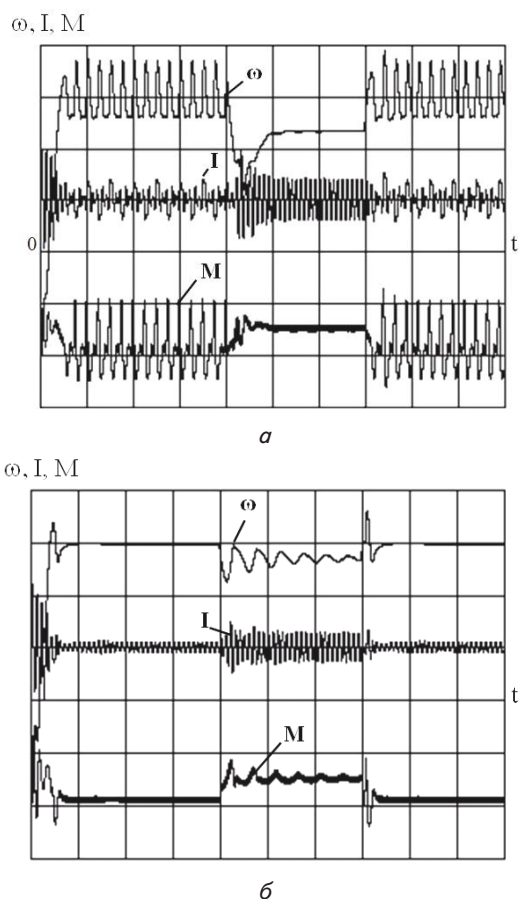


Рис. 12. Осциллограммы процесса пуска и наброса – сброса нагрузки двигателя 4A100L4, 4 кВт,  $J_{\Sigma M}=1,1 J_{дв}$ :  
 а – управляющее воздействие  $\alpha=70$  эл. град;  
 б – управляющее воздействие  $U_1=0,85U_n$ . Масштабы переменных:  $mt=0,2$  с/дел.;  $m_M=2$  Мн/дел.;  $m_\omega=0,2 \omega_0$ /дел.

### 5. Обсуждение результатов применения упрощенного метода исследования устойчивости разомкнутой системы ЭП «ТПН-АД»

Применение предложенного упрощенного численно-аналитического метода исследования устойчивости ЭП ТПН-АД позволяет, при минимальных погрешностях, производить поиск зоны неустойчивой работы, причем с затратами времени в 20–30 раз меньшими, нежели подобные экспериментальные исследования или исследования при помощи математической модели ЭП [25]. Расхождения в результатах анализа устойчивости по упрощенному методу и с помощью эксперимента можно объяснить:

- невозможностью полного учета нелинейных свойств в динамических режимах работы ЭП;
- наличием зависимости формирования автоколебаний от начальных условий;
- неизбежными погрешностями при математическом описании и моделировании процессов (функциональной идентификации выходного напряжения ТПН, численных решений определителей высоко порядка и т. д.);
- относительной сложностью поиска точной границы зоны неустойчивой работы ТПН-АД при помощи эксперимента и при помощи математических моделей.

Проиллюстрировано, что характер режима больших колебаний и его параметры – частота и амплитуда колебаний момента и скорости, зависит от схемотехнических решений, принятых при проектировании СИФУ и выходных каскадов ТПН. Обнаруженные различия в динамике электропривода являются методически важными, так как дают возможность отождествить по свойствам реальные системы электропривода с различными вариантами их моделей и обосновать границы применимости аналитических методов и различных вариантов математических моделей при исследовании ТПН-АД в режиме больших колебаний. Различия в динамике колебательного режима возможны только в электроприводе с ТПН, имеющем синхронизацию вентиля с напряжением сети и в котором формируются “широкие” импульсы управления. При исполнении синхронизации вентиля с током статора колебательные режимы вообще не возникают, а из-за того, что вентили получают управление от индивидуальных “узких” импульсов, исключается ошибочная коммутация.

Настоящие исследования являются продолжением теоретических исследований статических, динамических и энергетических характеристик электроприводов ТПН-АД, проводимых более 20 лет в институте электромеханики и энергоменеджмента Одесского национального политехнического университета Украины.

Особенностью настоящей работы являются исследования разомкнутых и замкнутых систем ЭП ТПН-АД, выполненные не только при помощи методов математического моделирования, но и на действующих экспериментальных установках, прежде всего на лифтовых подъемно-транспортных электромеханических системах. Возможность анализа экспериментальных данных в специфичных режимах работы, к которым можно отнести неустойчивые режимы работы разомкнутых систем ТПН-АД, позволила, в некоторых моментах, иначе взглянуть на физику процессов и методы исследования ЭП. Продолжение исследований видится в разработке технических рекомендаций по реализации алгоритма управления, согласно способу формирования выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки.

### 6. Выводы

1. Определена передаточная функция электромагнитной части асинхронного двигателя, которая характеризует переходную функцию при учете характерных составляющих электромагнитного момента двигателя. Предложен упрощенный метод исследования устойчивости разомкнутой системы электропривода ТПН-АД, сочетающий аналитические способы исследования с расчетно-численными методами. Метод является универсальным, учитывает нелинейности АД, ТПН и может применяться для исследования устойчивости ЭП со всеми известными асинхронными двигателями.
2. Исследование динамических свойств асинхронных двигателей в разомкнутой системе ЭП ТПН-АД подтвердило, что вид, характер и само наличие неустойчивых режимов работы АД полностью зависит от параметров электропривода и начальных электромагнитных условий. Определено, что в области рабочих скольжений неустойчивым режимам работы наиболее

подвержены ЭП ТПН-АД с асинхронными двигателями средней мощности. В каждом семействе асинхронных двигателей серии 4А существует «граничный» АД, с которым электропривод обладает максимальной зоной неустойчивой работы, тогда как при использовании двигателей большей или меньшей мощности, зона неустойчивой работы уменьшается. Анализ соотношений некоторых постоянных времени электропривода позволяет не только косвенным путем анализировать возникновение неустойчивой работы разомкнутой системы электропривода ТПН-АД, но и разрабатывать рекомендации по применению различных типов двигателей в пределах одной серии.

3. Режим колебаний без срывов коммутации, как это наблюдается в ЭП ТПН-АД с шестиканальной СИФУ, не может быть принципиально описан аналитически, поскольку даже после преодоления трудно-

стей линеаризации параметров и характеристик АД и ТПН формируется вариант колебаний по сценарию ЭП с трехканальной СИФУ.

Предложен способ управления трехфазным тиристорным преобразователем напряжения, при котором обеспечивается заданное выходное напряжение преобразователя, независимо от фазы тока нагрузки. Характерной особенностью способа управления является обеспечение системой управления пропорциональной зависимости между напряжением управления и выходным напряжением ТПН. При этом действие внутренней обратной связи автоматически компенсируется соответствующими изменениями текущего угла управления. Благодаря этой особенности, применение данного способа обеспечивает принципиальное отсутствие неустойчивости разомкнутых систем ЭП ТПН-АД во всех режимах их работы.

#### Литература

- Jiang, Z. Simulation Study of Heavy Motor Soft Starter Based on Discrete Variable Frequency [Text] / Z. Jiang, X. Huang, N. Lin // 2009 4th International Conference on Computer Science & Education, 2009. – P. 560–563. doi: 10.1109/iccse.2009.5228368
- Gui-xi, J. Research on Intelligent Soft Starter of Asynchronous Electromotor [Text] / J. Gui-xi, S. Hong-jun // 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems. – 2009. – Vol. 2. – P. 303–307. doi: 10.1109/gcis.2009.104
- Tremlin, R. Soft-Start drives [Text] / R. Tremlin // Wire Ind. – 2006. – Vol. 626. – P. 92–96.
- Tunyasrirut, S. Phase control thyristor based soft-starter for a grid connected induction generator for wind turbine system [Text] / S. Tunyasrirut, B. Wangsilabatra, T. // Control Automation and Systems (ICCAS), International Conference, 2010. – P. 529–534.
- Ghadimi, M. Soft Starter Modeling for an Induction Drive Starting Study in an Industrial Plant [Text] / M. Ghadimi, A. Ramezani, M. Mohammadimehro // 2011 UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation, 2011. – P. 245–250. doi: 10.1109/ems.2011.57
- Liang, X. Induction Motor Starting in Practical Industrial Applications [Text] / X. Liang, O. Plochonwu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol. 47, Issue 1. – P. 271–280. doi: 10.1109/tia.2010.2090848
- Zhang, P. A Nonintrusive Winding Heating Method for Induction Motor Using SoftStarter for Preventing Moisture Condensation [Text] / P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, B. Lu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2012. – Vol. 48, Issue 1. – P. 117–123. doi: 10.1109/tia.2011.2175875
- Yeh, C. Demerdash NAO Fault tolerant soft starter control of induction motor with reduced transient torque pulsations [Text] / C. Yeh // IEEE Trans Energy Convers. – 2009. – Vol. 24, Issue 4. – P. 22–32.
- Prado, A. Phase-Mode Transformation Matrix Application for Transmission Line and Electromagnetic Transient Analyses [Text] / A. Prado, S. Kurokawa, L. Bovolato, J. Filho. – New York: Nova Science Pub Inc, 2011. – 40 p.
- Jemli, M. Sensorless indirect stator field orientation speed control for single-phase induction motor drive [Text] / M. Jemli, H. B. Azza, M. Boussak, M. Gossa // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, Issue 6. – P. 1618–1627. doi: 10.1109/tpel.2009.2014867
- Лоторейнук, Е. А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Е. А. Лоторейнук. – М.: Форум, 2010. – 340 с.
- Андрющенко, О. А. Неустойчивые режимы электропривода ТПН-АД при синхронизации вентилей с напряжением сети [Текст]: респ. міжвід. наук.-техн. зб. / О. А. Андрющенко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 1999. – Вип. 52. – С. 25–30.
- Andryushchenko, O. Maple Software Applied for Stability Research of Electric Drive TVC-IM [Text] / O. Andryushchenko, A. Boyko // Simulation News Europe. – 2003. – Vol. 38/39. – P. 35–37.
- Герасимьяк, Р. П. Динамика элементов автоматизированного электропривода [Текст]: учеб. пос. / Р. П. Герасимьяк. – К.: УМВ ВО, 1989. – 100 с.
- Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М. Я. Выгодский. – М.: Астрель, 2006. – 994 с.
- Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А [Текст]: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
- Герасимьяк, Р. П. Управление асинхронным электроприводом механизмов поворота, обеспечивающее снижение динамических нагрузок [Текст] / Р. П. Герасимьяк, Е. В. Найденко // Вісник НТУ «ХПИ» Проблеми автоматизированного електропривода. Теорія і практика. – 2008. – № 30. – С. 111–112.

18. Радимов, С. Н. Экспериментальное исследование электромагнитной совместимости кранового электропривода ТПН-АД с сетью [Текст] / С. Н. Радимов, В. Л. Беляев, А. Н. Бесараб, А. Н., К. А. Аниченко, Я. А. Соколов // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 10(86). – С. 16–21.
19. Бойко, А. О. Моделирование системы ТПН-АД [Текст] / А. О. Бойко, А. А. Бересан. – Математическое моделирование, 2010. – С. 39–42.
20. Бойко, А. А. Ограничение неустойчивых режимов работы лифтовых подъемных механизмов с электроприводом ТПН-АД [Текст] / А. А. Бойко // Підйомно-транспортна техніка. – 2014. – Вып. 2 (42). – С. 36–45.
21. Бойко, А. А. Динамические свойства асинхронных электродвигателей [Текст] / А. А. Бойко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2000. – № 2(7). – С. 75–80.
22. Петров, Л. П. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода [Текст] / Л. П. Петров, О. А. Андриющенко, В. И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
23. Зюзев, А. М. К построению бездатчикового электропривода системы ТПН-АД [Текст] / А. М. Зюзев, К. Е. Нестеров // Электротехника. – 2009. – № 9. – С. 38–41.
24. Семенюк, В. Ф. Влияние динамики пуска на коэффициент полезного действия лебедки лифта [Текст] / В. Ф. Семенюк, А. А. Бойко, О. Б. Кнюх // Науково-технічний та виробничий журнал «Підйомно-транспортна техніка». – 2015. – Вып. 2 (46). – С. 37–46.
25. Андриющенко, О. А. Формирование выходного напряжения ТПН, инвариантного фазе тока нагрузки [Текст] / О. А. Андриющенко, А. А. Бойко, Я. Б. Волянская // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – № 66. – С. 33–34.