

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Калинов А.П., к.т.н., доц., Юхименко М.Ю., ст. преп., Исаев С.В.

Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского

39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20

E-mail: scenter@polytech.poltava.ua

В статті розглянуті питання вибору раціональних способів формування пускових режимів асинхронного електроприводу, залежно від умов роботи технологічних машин і механізмів. Досліджені на математичних моделях можливості покращення умов запуску двигуна в системі «перетворювач напруги – АД». Результати досліджень вказують на доцільність використання для формування пускових режимів регуляторів напруги в колі статора АД, побудованих на повністю керованих ключових елементах з використанням високочастотної широтно-імпульсної модуляції.

Ключові слова: Пускові режими АД, обмеження пускового струму, формування пускового моменту, критерії ефективності пускових режимів, регулятори напруги.

The paper deals with the problem of finding the rational method of forming of the starting modes of induction motor depending on the technological conditions of machines and mechanisms operation. The possibility of voltage-variable induction electric drive dynamics increase has been investigated. The results of research show that it is reasonable to use for forming of the starting modes induction electric drives with voltage regulators in the circle of stator of the induction motors designed on key elements full regulated with high-frequency pulse-width modulation.

Key words: Starting modes of AC drive, limitations of starting current, forming of starting moment, criteria of efficiency of the starting modes, regulators of voltage.

Ведение. Режим пуска электроприводов технологических механизмов характеризуется концентрацией электрических, механических и электродинамических нагрузок, прикладываемых к соответствующим узлам электродвигателя и рабочей машины. Возникающие переходные электромагнитные моменты имеют знакопеременный характер, и основная задача управления заключается в общем случае в максимальном их ограничении. Необходимость применения пусковых систем вызвана не только особенностями механических характеристик промышленных механизмов [2], применяемых электродвигателей, но также и эксплуатационными характеристиками питающих электрических сетей. Традиционно указанные проблемы решаются путем плавного пуска и формирования напряжения на двигателе с помощью тиристорных регуляторов напряжения, применение которых обусловлено их хорошими технико-экономическими показателями. Существующие системы электроприводов, как правило, не учитывают весь комплекс факторов, влияющих на качество пусковых режимов. При этом одновременно с ограничением максимального пускового тока и устранением знакопеременных составляющих момента двигателя затягивается переходный процесс [1]. Кроме того, как правило, не учитывается возможность просадки напряжения питающей сети, возможны автоколебания механических координат двигателя по завершении процесса запуска. Это, в итоге, приводит к увеличению потерь в пусковых

режимах.

Анализ предыдущих исследований. Создание и исследование систем управляемого пуска двигателей переменного тока достаточно широко освещено в отечественной и зарубежной литературе [1, 2]. Применение таких систем позволяет решить ряд актуальных задач уменьшения негативного влияния пускотормозных режимов на ресурс работы как самого двигателя, так и технологического механизма. С точки зрения экономической эффективности, наиболее оправданным является тиристорный регулятор напряжения (ТРН), как устройство формирования пусковых режимов. Анализ существующих систем показал необходимость разработки дополнительных научных и технических решений, обеспечивающих повышение эффективности пусковых режимов.

Цель работы - исследование эффективности применения различных способов реализации пусковых режимов в системе «преобразователь напряжения-асинхронный двигатель» (ПН-АД) и повышения их эффективности в замкнутых системах электропривода с обратными связями по току, напряжению и электромагнитному моменту.

Материал и результаты исследований. Исследования характеристик формируемых пусковых режимов проводились на математической модели АД в системе координат $\alpha, \beta, 0$. При этом изменение напряжения принималось как изменение амплитуды его синусоидальной составляющей по осям модели. Такой подход является оправданным при использо-

вании в качестве ключевых элементов ПН не встречно-параллельно включенных тиристоров, а схем с силовыми транзисторами, включенными в цепь постоянного тока диодных мостов в фазах двигателя (рис. 2). При такой схемной реализации силового канала в случае использования достаточно высокой частоты коммутации транзисторов допустимо считать, что уровень высших гармоник напряжения на выходе регулятора незначителен, и при регулировании изменяется амплитуда первой гармоники.

При моделировании рассматривались следующие способы изменения напряжения при пуске (рис. 1, а): 1 – линейное изменение напряжения, 2 – линейный закон с ненулевыми начальными условиями, 3 – линейный закон с предварительной кратковременной ступенчатой подачей напряжения; (рис. 1, б): 1 – изменение напряжения по экспоненциальному закону, 2 – экспоненциальный закон с ненулевыми начальными условиями, 3 – экспоненциальный закон с предварительной кратковременной ступенчатой подачей напряжения.

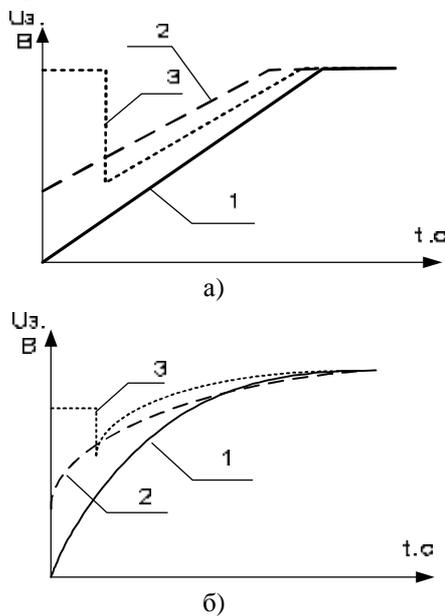


Рисунок 1 – Кривые напряжения статора при различных законах изменения напряжения задания

В качестве критериев оценки эффективности формирования пусковых режимов были приняты следующие показатели: момент максимальный, средний момент за время пуска, максимальный пусковой ток, потери энергии за время пуска, наличие колебаний момента. В ходе исследований были выявлены основные недостатки формирования напряжения задания в соответствии с рассматриваемыми способами:

- при положительном решении задачи ограничения пускового тока и устранения знакопеременных моментов значительно затягивается переходной процесс;
- при определенных значениях времени переходного процесса возрастают потери энергии за

время пуска.

Частично указанные проблемы решаются за счет задания напряжения по линейному и экспоненциальному закону с ненулевыми начальными значениями.

Указанные недостатки могут быть устранены применением замкнутых систем управления. Такие системы позволяют избежать ухудшения характеристик переходных процессов при наличии возмущений (просадки напряжения, пульсаций момента нагрузки на валу). Наибольший интерес представляют системы с обратной связью по току статора и обратной связью по электромагнитному моменту в виду простоты их технической реализации. При этом мгновенное значение момента рассчитывается на основе потребляемой мощности:

$$M(t) = \frac{1}{\omega_0} (P_{\text{потр.}}(t) - \Delta P_{\text{м1}}(t)), \quad (1)$$

где: ω_0 – угловая скорость идеального холостого хода, рад/с;

$P_{\text{п}}(t) = u_A(t) \cdot i_A(t) + u_B(t) \cdot i_B(t) + u_C(t) \cdot i_C(t)$;

– мгновенная потребляемая мощность; $\Delta P_{\text{м1}}(t)$ – мгновенная мощность потерь в меди статора.

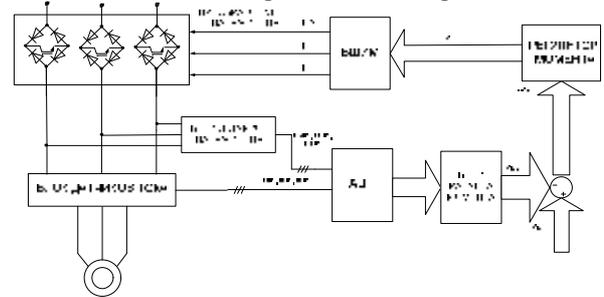


Рисунок 2 – Структурная схема цифровой системы формирования пусковых режимов АД с обратной связью по электромагнитному моменту двигателя

На рисунках 3-6 приведены сравнительные характеристики формирования переходных процессов при пуске асинхронного двигателя 4АН355М2 (1 – прямой пуск, 2 – пуск с отрицательной обратной связью по моменту, 3 – пуск с отрицательной обратной связью по току статора, 4 – пуск с пониженным напряжением).

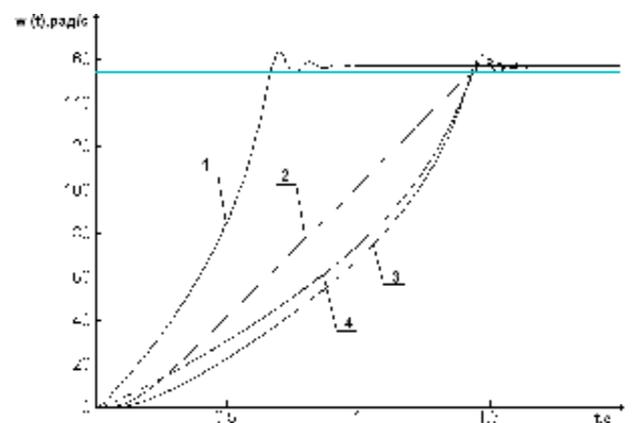


Рисунок 3 – Переходные процессы по угловой

скорости при различных вариантах управления пуском

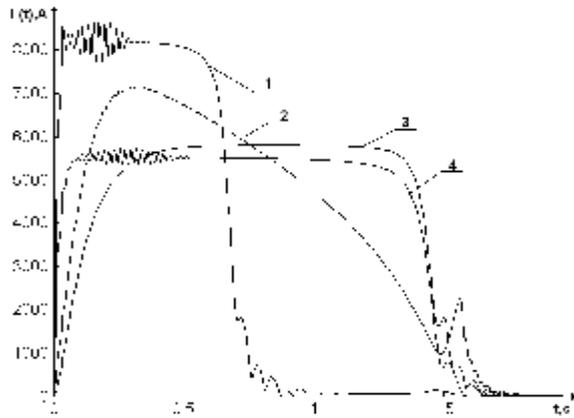


Рисунок 4 – Переходные процессы тока статора при различных вариантах управления пуском

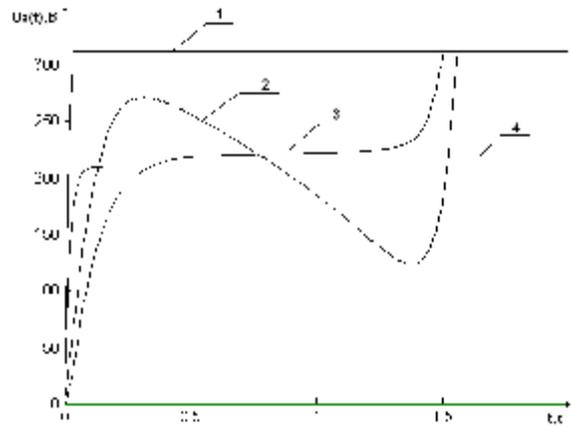


Рисунок 5 – Переходные процессы по напряжению при различных вариантах управления пуском

Таблица 1 – Значения параметров пуска АД 4АН355М2 при различных законах формирования напряжения статора

Параметры пускового режима						
№	I_{\max}, A	$M_{\max}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$M_{\text{ср.пуск}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$\Delta P_{\max}, \text{Вт}$	$t_{\text{п}}, \text{с}$	$\Delta W, \text{Вт}\cdot\text{с}$
1	8720	9275	3330	1288000	0,67	709600
2	7140	2100	1530	868000	1,43	705400
3	5800	5850	1557	577250	1,43	704200
4	5720	4780	1538	560500	1,43	703900

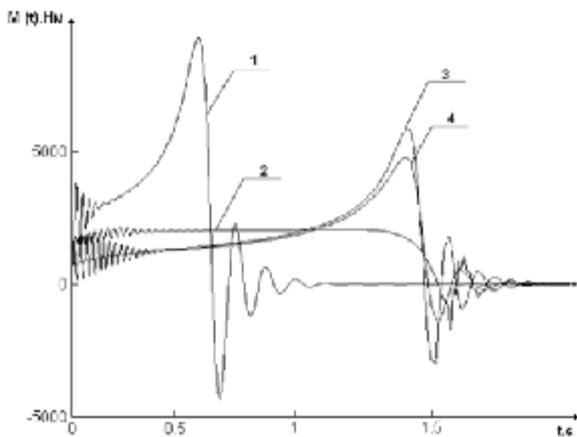


Рисунок 6 – Кривые переходных процессов по моменту двигателя при различных вариантах управления пуском

Анализ пусковых режимов при различных вариантах управления пуском показал, что количество выделяемой энергии в обмотках машины практически не изменяется (уменьшение не более, чем на 5-6%), а в системе с отрицательной обратной связью по электромагнитному моменту - уменьшается на 10%, при этом: снижается интенсивность нагрева, уменьшаются электродинамические усилия на обмотки при пуске, вибрации. Пуск в системе с отрицательной обратной связью по току, по сравнению с пуском с пониженным напряжением, является более

эффективным: уменьшаются колебания момента, увеличивается максимальный момент. Система с отрицательной обратной связью по электромагнитному моменту является эффективной для устранения знакопеременной составляющей момента и осуществления безударного пуска с постоянным значением момента. С применением замкнутых систем устраняется проблема автоколебаний координат системы ТРН-АД в конце пуска.

Приведенные исследования проводились на упрощенных математических моделях, которые не учитывают реальные свойства полупроводниковых преобразователей. Некоторые особенности работы полупроводниковых преобразователей с асинхронным двигателем играют решающую роль в формировании характеристик. Например, в системе ТРН-АД (рис. 7) зависимость выходного напряжения от угла управления и скольжения двигателя может вызывать автоколебания в системе. Для учета указанных факторов были разработаны математические модели силовых схем и асинхронного двигателя в расширении Sym Power Systems математического пакета MatLab.

В ходе исследований было установлено, что для пуска асинхронных машин большой мощности наиболее рациональным является применение тиристорных преобразовательных устройств. При этом пульсации напряжения и неполная управляемость силовых вентилях практически не влияет на эффек-

тивность формирования пусковых характеристик. В схеме ТРН-АД для устранения нелинейных регулировочных характеристик целесообразно вводить в систему управления контур регулирования напряжения.

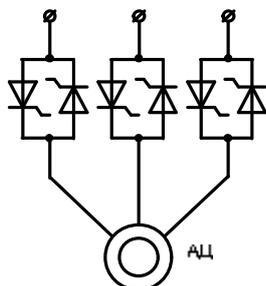


Рисунок 7 – Силовая схема тиристорного регулятора напряжения

Анализ пусковых режимов двигателей малой мощности показал эффективность применения транзисторных схем для управления асинхронным двигателем.

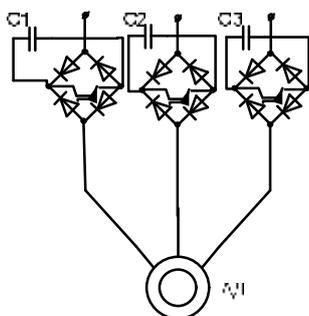


Рисунок 8 – Силовая схема транзисторного регулятора напряжения с дополнительными емкостями, включенными параллельно силовым ключам

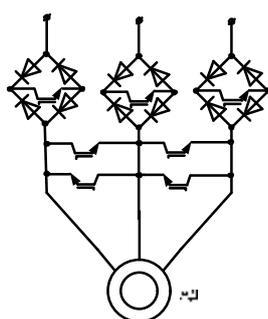


Рисунок 9 – Силовая схема транзисторного регулятора напряжения с замыкающими транзисторами

Использование транзисторных регуляторов напряжения в статорных цепях АД сопряжено с режимами жесткой коммутации транзисторных ключей, вызванной перенапряжениями при коммутировании активно-индуктивной нагрузки. Это вызывает необходимость применения шунтирующих конденсато-

ров (рис. 8) или замыкающих вентилях (рис. 9) для создания пути протекания тока через обмотку после замыкания транзистора. От величины емкости зависят уровни перенапряжения при коммутации ключей. При этом регулировочная характеристика становится нелинейной и не исключается режим автоколебаний после завершения пуска. Применение транзисторных схем с замыкающими вентилями является более рациональным по сравнению со схемами с шунтирующими емкостями, так как обеспечивает линейность регулировочной характеристики. В схеме с замыкающими транзисторами получаются хорошие регулировочные характеристики и устраняются вышеуказанные недостатки. При этом нет необходимости в установке дополнительных емкостей, однако количество транзисторов в схеме увеличивается до 7 (рис. 9).

На рис. 10-19 представлены сравнительные результаты моделирования пусковых режимов для системы с тиристорным регулятором напряжения в цепи статора АД (рис. 7) и для системы с транзисторным регулятором (рис. 8-9). Из графиков видно, что наиболее качественно режим пуска протекает в системах с обратными связями по току статора или по электромагнитному моменту двигателя.

Выводы. Результаты исследований на математических моделях показали перспективность использования пусковых систем асинхронного электропривода, построенных на базе силовых полупроводниковых ключей с полной управляемостью, а также перспективность использования обратных связей по моменту АД. Пуск в системе с отрицательной обратной связью по току, по сравнению с пуском при пониженном напряжении, является более эффективным: уменьшаются колебания момента двигателя, увеличивается максимальный пусковой момент, система с отрицательной обратной связью по электромагнитному моменту является эффективной для устранения знакопеременной составляющей момента и осуществления безударного пуска с постоянным значением момента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных электродвигателей. – М.: Энергоиздат, 1981. - 184 с.
2. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография. - Кременчуг: 2006. - 280 с.
3. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; за ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.

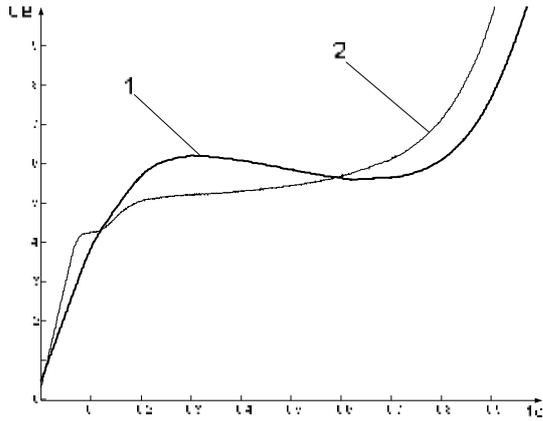


Рисунок 10 - Кривые напряжения управления при пуске АД в схеме ТРН:
1- в системе с обратной связью по электромагнитному моменту; 2 – в системе с обратной связью по току статора

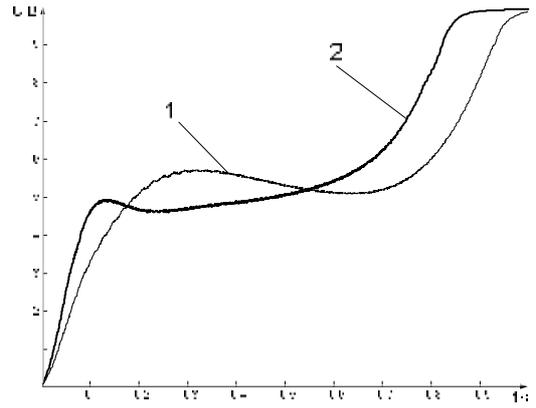


Рисунок 15 – Кривые напряжения управления при пуске АД в транзисторной схеме:
1- в системе с обратной связью по электромагнитному моменту; 2 – в системе с обратной связью по току статора

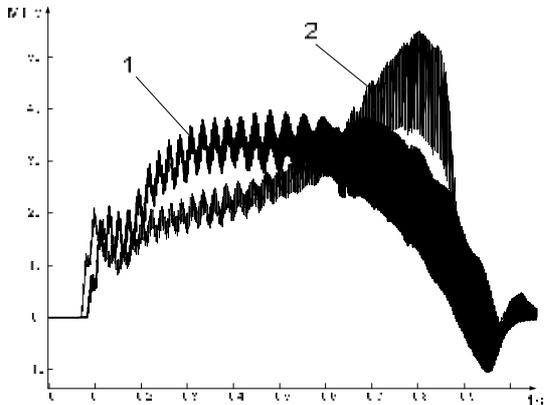


Рисунок 11 – Кривые электромагнитного момента АД при пуске в тиристорной схеме:
1- в системе с обратной связью по электромагнитному моменту; 2 – в системе с обратной связью по току статора

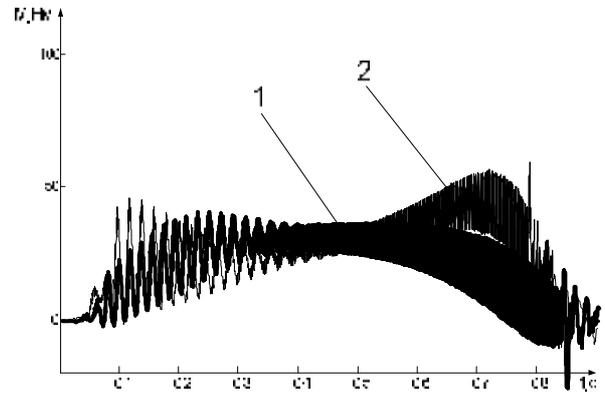


Рисунок 16 – Кривые электромагнитного момента двигателя при пуске АД в транзисторной схеме:
1- в системе с обратной связью по электромагнитному моменту; 2 – в системе с обратной связью по току статора

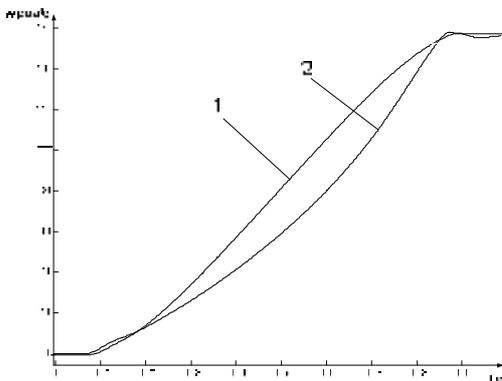


Рисунок 12 – Кривые переходного процесса по угловой скорости при пуске АД в тиристорной схеме:
1- в системе с обратной связью по электромагнитному моменту; 2 – в системе с обратной связью по току статора

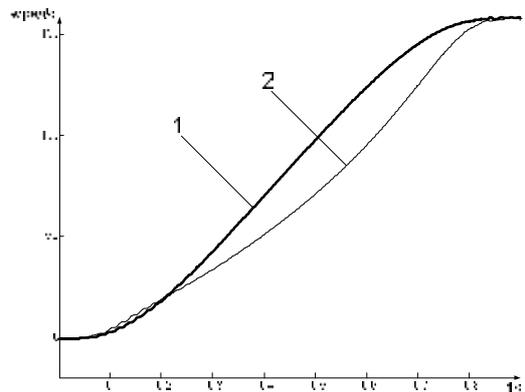


Рисунок 17 – Угловые частоты вращения при пуске АД в транзисторной схеме:
1- в системе с обратной связью по электромагнитному моменту; 2 – в системе с обратной связью по току статора

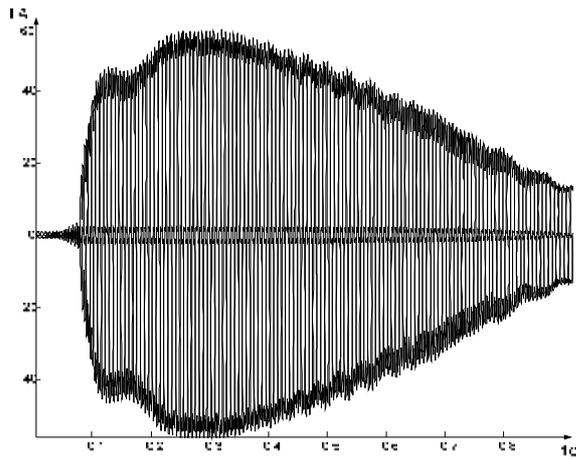


Рисунок 13 – Ток статора при пуске АД в тиристорной схеме в системе с обратной связью по электромагнитному моменту

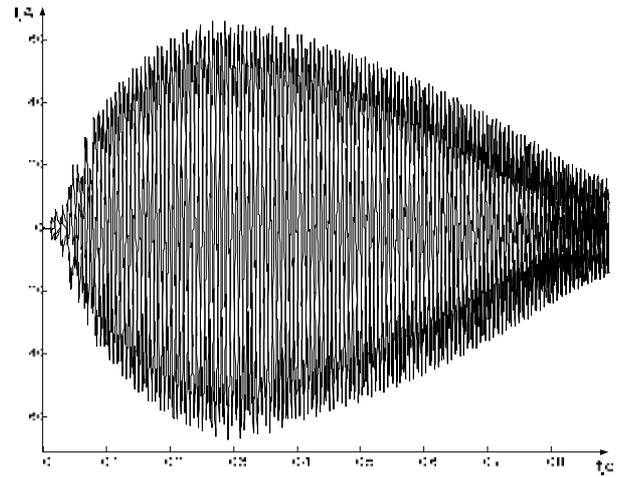


Рисунок 18 – Ток статора при пуске АД в транзисторной схеме в системе с обратной связью по электромагнитному моменту

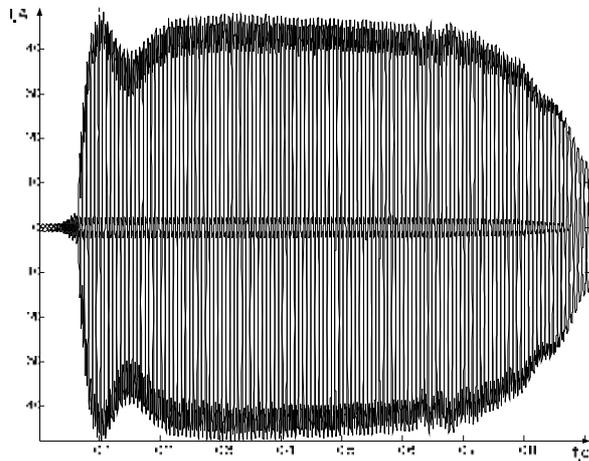


Рисунок 14 – Ток статора при пуске АД в тиристорной схеме в системе с обратной связью по току статора

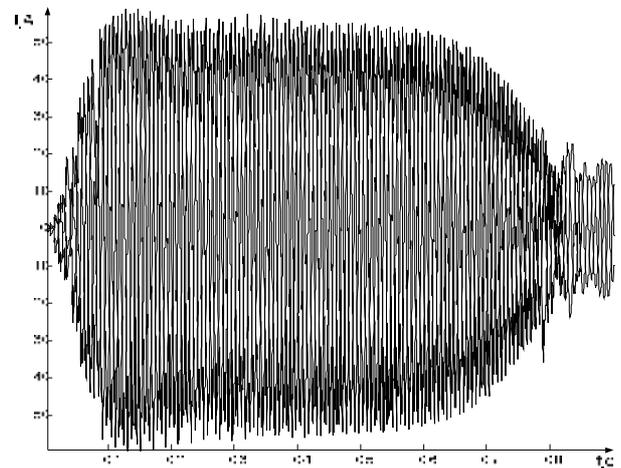


Рисунок 19 – Ток статора при пуске АД в транзисторной схеме в системе с обратной связью по току статора

Стаття надійшла 5.04.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.

