

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ТРАНЗИСТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ

*Юхименко М.Ю., ст. преподаватель.*

*Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39614*

*E-mail: [saue1@polytech.poltava.ua](mailto:saue1@polytech.poltava.ua)*

### Введение.

Автоматизированные электроприводы переменного тока с питанием от силовых полупроводниковых преобразователей получили в настоящее время широкое практическое применение. Процессы, протекающие в таких системах, достаточно подробно описаны в литературе [1, 2, 5]. Коммутация статорных цепей асинхронного двигателя (АД) осуществляется с помощью тиристорных или транзисторных преобразователей позволяет расширить регулировочные и динамические характеристики асинхронного электропривода. Транзисторные преобразователи выполняют функции бесконтактного безинерционного пускателя и регулятора напряжения, подводимого к двигателю. Они позволяют: плавно регулировать частоту вращения АД, реализовывать различные тормозные режимы; и, что особенно важно для электроприводов технологических механизмов, изменяют законы изменения угла открытия транзисторов в определенном темпе [3]; направленно влиять на характер переходных процессов, обусловленных электромеханическим преобразованием энергии в асинхронном двигателе.

### Анализ предыдущих исследований.

Полупроводниковые преобразователи, используемые в электроприводах, предназначены для преобразования электрической энергии, получаемой из сети с параметрами  $U_1, f_1$  в электрическую энергию с параметрами  $U_2, f_2$  при воздействии соответствующих сигналов управления. Свойства силовых полупроводниковых преобразователей изучаются на основе их основных характеристик, которые разделяют на статические, квазиустановившиеся и динамические.

К квазиустановившимся характеристикам в силовых преобразователях относят:

- мгновенные электромагнитные процессы в нагрузке, в источнике питания и силовых полупроводниковых элементах в установившемся режиме работы полупроводникового преобразователя;

- спектральные характеристики – спектры напряжения и тока в цепи питания и в нагрузке преобразователя.

К динамическим характеристикам в силовых полупроводниковых преобразователях относят:

- переходные электромагнитные процессы в нагрузке и источнике питания при скачкообразном изменении величины входного сигнала;

- переходные электромагнитные процессы в нагрузке при скачкообразном изменении параметров источника питания;

- переходные электромагнитные процессы в источнике питания при скачкообразном изменении параметров нагрузки;

- переходные электромагнитные процессы в полупроводниковых элементах преобразователя при их переключении.

**Цель работы.** Исследование и анализ электромеханических процессов в электроприводах с асинхронными двигателями и транзисторными преобразователями напряжения.

**Материалы и результаты исследований.** Транзисторный импульсный преобразователь напряжения в системе регулируемого электропривода в общем случае представляет собой нелинейное звено с дискретно изменяющимися параметрами.

В соответствии с сигналами управления формируется напряжение каждой фазы нагрузки. Коэффициент модуляции транзисторного преобразователя представляет собой отношение амплитуды модулирующего напряжения  $U_{тмод}$  к амплитуде пилообразного напряжения  $U_{тнес}$ :

$$M = U_{тмод} / U_{тнес} \quad (1)$$

В диапазоне изменения коэффициента модуляции  $0 < M < 1$  преобразователь работает в линейной зоне.

Для исследования свойств характеристик транзисторных преобразователей разработаны различные модели: линеаризованные, на основе регрессионных уравнений, с использованием переключающих функций и пр. Удобным аппаратом для исследования является пакет MATLAB. Например, структурная схема модели фазы транзисторного преобразователя для снятия электромагнитных квазиустановившихся процессов и спектрального анализа представлена на рис. 1, с использованием такой модели выполнен ряд исследований, результаты которых показаны ниже. Параметры расчета: время расчета – 0,2 с, шаг дискретизации –  $1 \cdot 10^{-4}$  с.

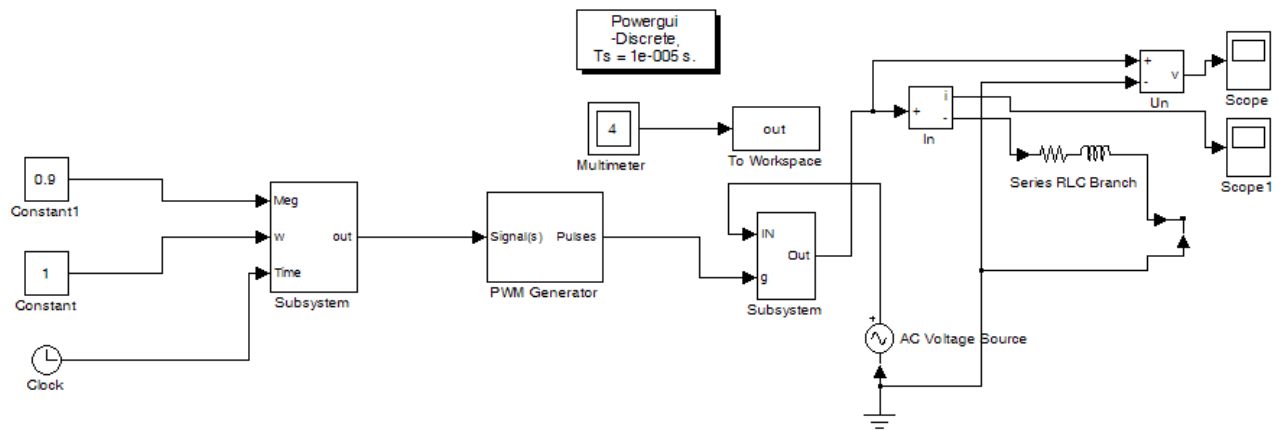


Рисунок 1 – Структурная схема модели для исследования квазиустановившихся электромагнитных процессов в транзисторном преобразователе напряжения, реализованная в среде пакета MATLAB

Напряжение на фазе А нагрузки и его спектр, полученные в результате моделирования, представлены на рис. 2. При этом ширина импульса изменяется по синусоидальному закону с частотой 50 Гц, коэффициент модуляции  $M = 0,9$ .

Сопrotивление ( $r = 0,1$  Ом), включенное в источник питания, моделирует внутреннее сопротивление источника.

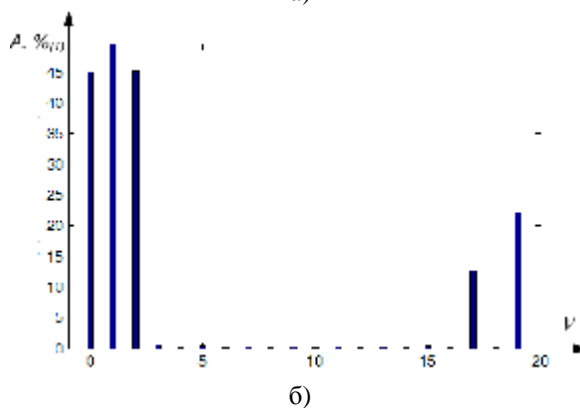
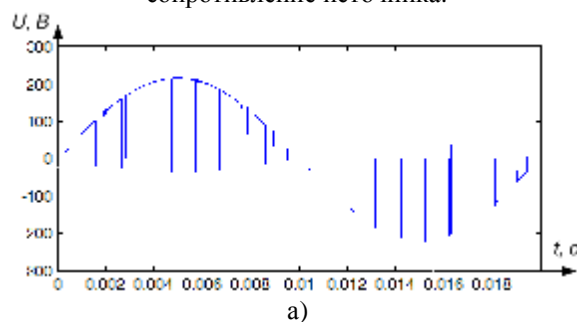


Рисунок 2 – Напряжение на фазе А нагрузки (а) и его гармонический состав (б), полученные с использованием блока Powergui на модели (рис.1)

Получены временные диаграммы для напряжения на  $RL$ -нагрузке и тока нагрузки (рис. 3). Видно, что ток нагрузки изменяется по синусоидальному закону с периодом 0,02 с и определяется модулирующей функцией. Однако он также содержит высокочастотную составляющую, обусловленную импульсным режимом работы транзисторов с несущей частотой, равной 1 кГц, и относительно малой величиной индуктивности нагрузки  $L$ . Напряжение на нагрузке представляет собой последовательность высокочастотных прямоугольных импульсов. У огибающей этих

импульсов частота следования равна 50 Гц. Сами высокочастотные импульсы имеют переменную ширину, изменяющуюся по закону модулирующей функции, что позволило получить ШИМ.

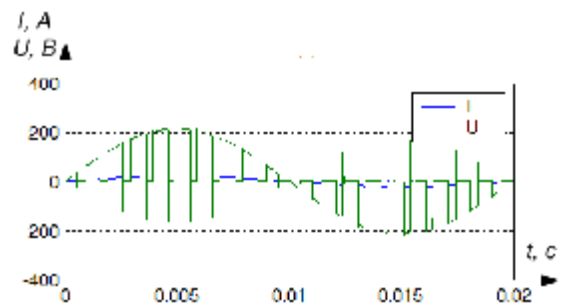


Рисунок 3 – Временные диаграммы для напряжения на  $RL$ -нагрузке и тока нагрузки

При исследовании электромеханических переходных процессов в системах электропривода переменного тока необходимо учитывать, что характерной особенностью, отличающей АД от обобщенной трехфазной активно-индуктивной нагрузки, является наличие магнитной связи между обмотками статора и ротора, а также влияние на эту связь скорости АД. При этом в обмотке фазы АД, отключенной от сети, наводится ЭДС вращения, значение которой, как и других параметров АД, зависит от скольжения. Электродвижущая сила существенно изменяет форму фазного напряжения по сравнению с обобщенной активно-индуктивной нагрузкой.

Для анализа электромагнитных процессов в этом случае используем динамическую модель двигателя, позволяющую определить ток статора двигателя. В межкоммутационных интервалах векторное уравнение статора АД в неподвижных координатах  $ab$  имеет вид:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= i_1 r_1 + \frac{dy_1}{dt} = i_1 r_1 + \\
 &+ \frac{d}{dt}(i_1 L_1 + i_2 L_m) = \\
 &= i_1 r_1 + \frac{d}{dt} \left( i_1 L_1 + \frac{L_m}{L_2} (y_2 - i_1 L_m) \right) = \\
 &= i_1 r_1 + L_1' \frac{di_1}{dt} + u_y,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $L_1'$  – переходная индуктивность статора, а  $u_y = \frac{L_m}{L_2} \frac{dy_2}{dt} = k_2 \frac{dy_2}{dt}$  – падение напряжения, создаваемое в обмотках статора магнитным потоком ротора. Если выделить проекции векторов в уравнении (2) на координатные оси, то получатся следующие уравнения:

$$\begin{aligned} u_{1a} &= i_{1a} r_1 + L_1' \frac{di_{1a}}{dt} + u_{ya}; \\ u_{1b} &= i_{1b} r_1 + L_1' \frac{di_{1b}}{dt} + u_{yb}. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку проекции векторов на ось  $\alpha$  соответствуют реальным величинам тока и напряжений в фазе  $a$ , значит

$$u_{1a} = i_{1a} r_1 + L_1' \frac{di_{1a}}{dt} + u_{ya}$$

и

$$(4)$$

$$i_{1a}(p) = \frac{u_{1a}(p) - u_{ya}(p)}{r_1(1 + T_1' p)},$$

т.е. обмотку статора АД можно представить в виде аperiodического звена первого порядка с постоянной времени  $T_1' = L_1' / r_1$ .

При ШИМ-регулировании напряжение статора в пределах межкоммутационного интервала является синусоидальной функцией времени с параметрами, определяемыми состоянием ключей, а ЭДС ротора равна:

$$u_{ya} = U_{ym} \sin(\omega_1 t + f_y) \approx \omega_1 k_2 y_{2m} \sin \omega_1 t.$$

Приближенное равенство справедливо при условии малой величины начальной фазы  $f_y$  ЭДС, что близко к действительной картине процессов в АД.

При частоте коммутации более чем на порядок превышающей частоту основной гармоники можно считать, что в пределах межкоммутационного интервала  $u_{1a} \approx \text{const}$  и соответствует некоторому среднему значению.

Если в качестве выходной величины рассматривается действующий ток нагрузки, то динамика транзисторного преобразователя напряжения определяется динамическими свойствами нагрузки. При исследовании динамики преобразователя переменного напряжения методом моделирования его можно заменить линейным аperiodическим звеном, постоянная времени которого принимается равной периоду несущего пилообразного напряжения.

С увеличением кратности несущей частоты при ШИМ также растет порядок  $n$  гармоник с наибольшими амплитудами, причем максимальными амплитудами характеризуются гармоники с частотами  $\frac{k \pm 1}{f_m}$ . Рост амплитуды

высокочастотных составляющих происходит за счет снижения амплитуд гармоник более низкого порядка [4].

Проведенные исследования показывают, что улучшение гармонического состава выходных фазных и линейных напряжений может быть

достигнуто, если обеспечивается повышение кратности несущей частоты и частоты коммутации и одновременно устраняются выбросы напряжения при коммутации активно-индуктивной нагрузки. В силовой схеме регулятора напряжения (РН) при синусоидальном напряжении сети это происходит, когда РН работает с высокими уровнями выходного напряжения.

Кроме показателей качества выходного напряжения для питания асинхронного двигателя, важное значение имеет обеспечение управляемости систем электропривода. На рис. 5 приведены осциллограммы пуска АД с короткозамкнутым ротором при питании от регулятора напряжения и при ограничении скорости нарастания подводимого напряжения. Осциллограммы показывают, что при пуске с постоянным значением начального напряжения ограничение пусковых токов и ударных электромагнитных моментов достигается за счет снижения быстродействия привода из-за уменьшения не только ударного, но и среднего момента АД.

Ограничение ударных моментов при пуске АД в системе с транзисторным преобразователем напряжения при одновременном сохранении приемлемого быстродействия электропривода может быть реализовано путем изменения приложенного к статору АД напряжения в процессе пуска. При этом увеличение напряжения происходит путем управления открытием силовых ключей от некоторого начального значения до номинального. Это достигается за счет изменения относительной длительности импульсов в процессе пуска АД. В этом случае электромагнитные переходные моменты будут ослаблены, а для сохранения быстродействия привода увеличение подводимого напряжения должно происходить достаточно быстро.

Для того чтобы реализовать плавный переход с одного участка рабочих характеристик на другой, т.е. увеличивать или уменьшать скорость привода, необходимо изменять управляющее воздействие с постоянной времени, превышающей электромагнитную и электромеханическую постоянную двигателя. При таком способе управления пуском АД изменение его скорости происходит последовательным переходом с одной промежуточной характеристики к другой. Это позволяет добиться однозначной зависимости между изменением управляющего воздействия и изменением скорости двигателя.

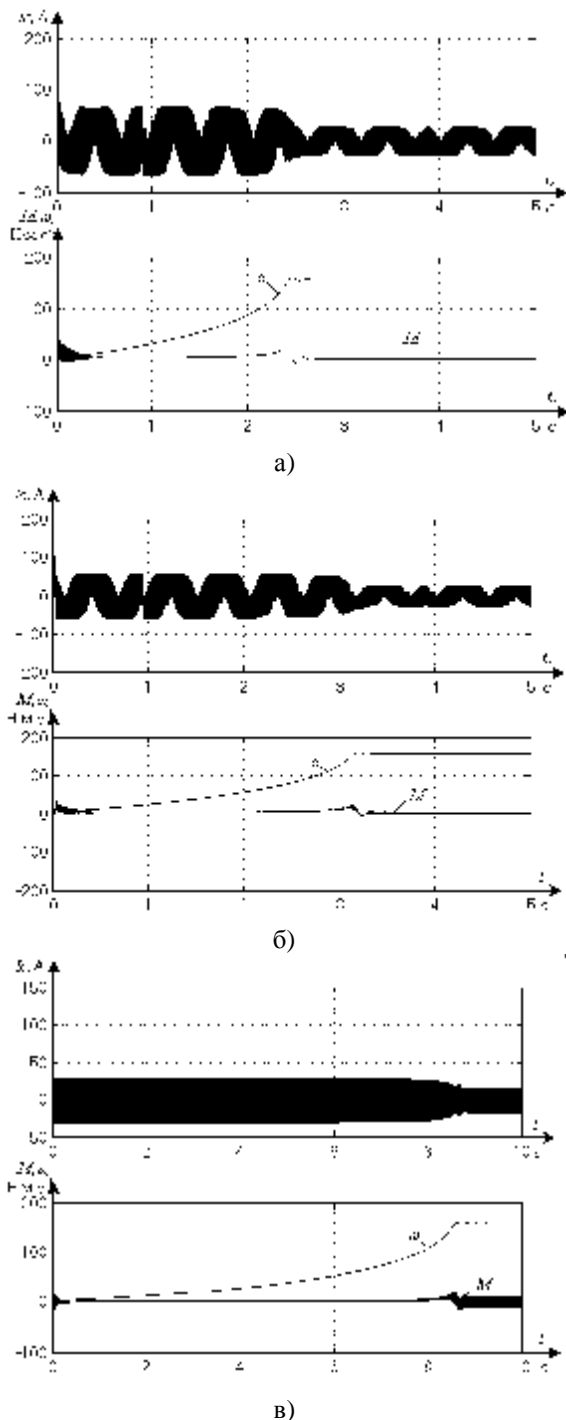


Рисунок 5 – Осциллограммы пуска АД при питании от РН для различных значений напряжения статора  
 а – прямой пуск; б – пуск при напряжении  $U_s = 0,7U_n$ ; в – пуск при напряжении статора  $U_s = 0,4U_n$

Скорость нарастания приложенного к АД напряжения может оставаться постоянной или меняться по определенному закону. Практически наиболее просто реализуется экспоненциальный закон изменения управляемой величины, к которому легко можно привести и режимы с постоянной скоростью изменения напряжения в начальной стадии процесса пуска. Поэтому можно принять, что приложенное к АД напряжение изменяется по закону:

$$u_s = U_{s \text{ уст.}} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_{du}}\right)} \right], \quad (5)$$

где  $U_{s \text{ уст.}}$  – установившееся значение приложенного напряжения;  $T_{du}$  – постоянная времени в относительных единицах, определяющая скорость нарастания напряжения на статоре двигателя.

Согласно [2], при значении  $T_{du} < 1$  ограничение ударных моментов не наблюдается, а при  $T_{du} > 4$  происходит увеличение времени разгона из-за значительного снижения момента двигателя. Если значение  $T_{du}$  составляет  $1 < T_{du} < 3$  время разгона сохраняется приблизительно таким, как и при прямом пуске, однако при  $T_{du} > 1,5$  происходит заметное уменьшение пиков ударных моментов. При этом характер влияния значения  $T_{du}$  на процесс разгона сохраняется для различных исполнений АД независимо от их мощности и числа пар полюсов [2]. Таким образом, минимальная скорость изменения напряжения, необходимая для сохранения быстродействия привода, определяется экспоненциальной функцией с постоянной времени 10-13 мс независимо от типа и параметров АД.

В системах электропривода с импульсным регулированием напряжения (ШИМ) изменение напряжения осуществляется за счет изменения скважности управляющих импульсов  $g$ . Проще всего реализовать изменение скважности по экспоненте:

$$g = g_0 e^{\left(\frac{t}{T_g}\right)}, \quad (6)$$

где  $T_g$  — постоянная времени, определяющая скорость увеличения коэффициента  $\gamma$ .

Изменение  $\gamma$  по (6) из-за нелинейного характера зависимости  $u_s(g)$  не приводит к изменению  $u_s$  согласно выражения (5). Однако результаты моделирования показывают, что для большинства асинхронных электроприводов промышленных механизмов динамические характеристики при изменении скважности по (6) практически не отличаются от характеристик, полученных при изменении  $u_s$  по (5) в случае равенства постоянных времени  $T_g$  и  $T_{du}$  [2]. При одинаковых параметрах электропривода начальные значения, момента при управлении по (3) несколько меньше и пуск происходит более плавно. Изменяя постоянную времени  $T_g$  и начальное значение скважности  $g_0$ , можно получить большое разнообразие динамических характеристик. Это обстоятельство делает применение такого управления для формирования динамических характеристик асинхронного электропривода достаточно приемлемым.

Ограничение и даже полное подавление знакопеременных переходных моментов без снижения среднего пускового момента двигателя и, следовательно, его быстродействия может быть достигнуто путем создания благоприятных ненулевых начальных электромагнитных условий. Для этого начальное значение магнитного потока должно быть равно его установившемуся значению для неподвижного АД. При соблюдении этого условия свободная составляющая потока не возникает и, следовательно, не возникают переходные моменты. При этом ударное значение пускового тока не ограничивается, поскольку переходный ток не зависит от изменения магнитного потока, а значение приложенного напряжения остается равным номинальному.

Математически это условие полного подавления переходных моментов может быть выражено [2]:

$$\bar{\Psi}_s(0) = -j \frac{\bar{u}_s(0)}{2}. \quad (7)$$

При несоблюдении этого условия знакопеременные моменты будут проявляться тем сильнее, чем больше отклонение начального потокосцепления  $\bar{\Psi}_s$  от значения, определяемого выражением (4). Знакопеременные моменты будут наибольшими в предельном случае, когда:

$$\bar{\Psi}_s(0) = j \frac{\bar{u}_s(0)}{2}. \quad (8)$$

Начальное потокосцепление  $\bar{\Psi}_s(0)$  может быть создано током одной или нескольких фаз. При этом положение его вектора в пространстве зависит от направления этих токов.

Результирующий вектор напряжения трехфазной системы  $\bar{u}_s$ , определяющий направление  $\bar{\Psi}_s(0)$  по условию (7), выражается через мгновенные значения фазных напряжений и совпадает с их максимумами. Поэтому если вектор  $\bar{\Psi}_s(0)$  перпендикулярен какой-либо из обмоток, то, учитывая поворот на  $90^\circ$ , определяемый наличием множителя  $-j$  в условии (7), подключение АД к трехфазной системе должно происходить только в максимуме напряжения этой фазы.

Отсюда следует, что практическая реализация такого пуска может достигаться подачей соответствующих импульсов напряжения на фазы АД. Вначале включаются две фазы на линейное напряжение, а включение третьей фазы должно производиться в любом из максимумов ее напряжения. Для ликвидации апериодической составляющей тока намагничивания при первом подключении двух фаз его следует производить также в максимуме линейного напряжения этих фаз.

На рис. 6 приведены осциллограммы пуска АД при нулевых и ненулевых начальных электромагнитных условиях, соответствующих (7). Изменение момента при прямом пуске с нулевыми начальными электромагнитными условиями имеет колебательный характер. При включении АД с

начальными электромагнитными условиями по (7) пики переходных моментов отсутствуют и значение момента в течение всего периода разгона незначительно отличается от его значения, рассчитанного по статической механической характеристике. Процесс пуска приближается к равноускоренному, а время пуска равно времени разгона при прямом включении АД. Таким образом, создание благоприятных ненулевых начальных электромагнитных условий может рассматриваться, как достаточно эффективный способ, как подавления электромагнитных переходных моментов, так и их полезного использования для формирования динамических характеристик асинхронного электропривода.

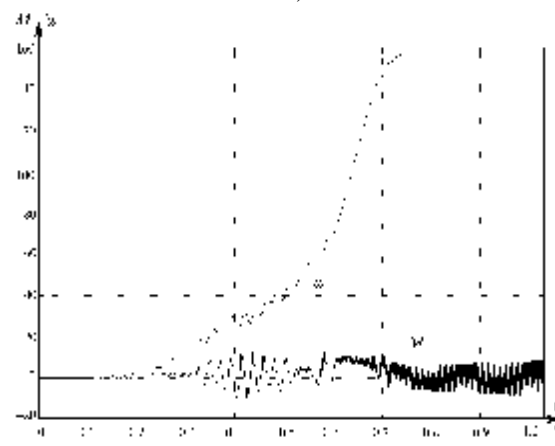
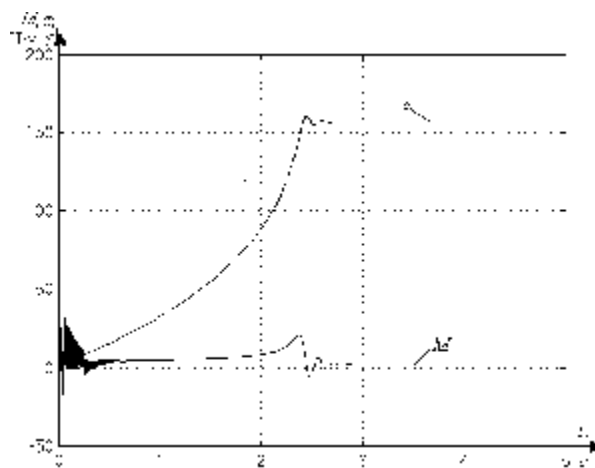


Рисунок 6 – Осциллограммы пуска АД при различных начальных электромагнитных условиях:  
а – при нулевых начальных условиях;  
б – при ненулевых условиях

**Выводы.** В работе на основе теоретических положений исследована модель, в которой асинхронный двигатель, получающий питание от трансформатора преобразователя напряжения представлен в виде соответствующих зависимостей (2)-(4). В модели учитывался дискретный характер напряжения преобразователя и электромагнитные переходные процессы, происходящие в электромеханической системе.

Синтезирована модель системы широтно-импульсного управления, преобразующая сигнал задания в управляющие импульсы. Результаты

моделирования электромагнитных процессов в системе с транзисторным преобразователем изображены на рис. 6, откуда следует, что инерционные свойства транзисторного импульсного преобразователя по отношению к инерционности обмоток статора асинхронного двигателя пренебрежимо малы и система вырождается в цепь первого порядка. Это исключает провалы и всплески тока статора при переходных процессах, вызванных скачкообразным изменением задающего сигнала. Наличие индуктивности в выходной цепи преобразователя обеспечивает значительное снижение пульсаций тока статора и соответственно напряжения на двигателе.

Из анализа электромагнитных процессов следует, что переход на высокую частоту преобразования энергии улучшает динамические характеристики преобразователя напряжения. Одновременно такой переход и использование транзисторного преобразователя для регулирования напряжения на статоре АД позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели всего силового канала электромеханической системы в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хасаев О.И. Транзисторные преобразователи напряжения и частоты. – М.: Наука, 1966. – 176 с.
2. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андрущенко, В.И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.: ил.
3. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С.Г. Герман-Галкин, В.Д. Лебедев, Б.А. Марков, Н.И. Чичерин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 248 с.
4. Шубенко В.А., Браславский И.Я., Шрейнер Р.Т. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением. – М.: Энергия, 1967. – 224 с.
5. Шубенко В.А., Браславский, И.Я., Кирпичников А.М., Ковшов А.Н. К исследованию динамики пуска асинхронных двигателей при тиристорном управлении // Электротехника. – 1969, № 6.
6. Грузов Л.Н. Методы математического исследования электрических машин. – М.: Госэнергоиздат, 1963. - 342 с.