

УСТРОЙСТВА ПРЕДПУСКОВОГО ТРОГАНИЯ ВОЗБУЖДЕННОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Введение. Исследованиями ряда авторов была установлена целесообразность разбивать процесс запуска электроприводов технологических механизмов с тяжелыми условиями пуска на два существенно отличающихся друг от друга периода: период трогания механизма, происходящий в начальной фазе формирования вращательного движения вала двигателя и последующий за ним – период формирования пускового режима вплоть до установившегося движения. В периоде (фазе) трогания вследствие развиваемого двигателем момента вал двигателя поворачивается на незначительный угол, достаточный, однако, для разрушения сформировавшиеся микро- и макромолекулярных связей между контактирующими поверхностями кинематических пар (цапф, вала с вкладышами подшипников); реологических связей между компонентами рабочего тела (вязкой массой) загрязненных жидкостей, вязких нефтепродуктов, конгломерата в шаровых или рудоразмольных механизмах и т.п. Первая стадия – наиболее ответственная, характеризующаяся состоянием целого ряда рабочих тел, не имеющих непосредственного отношения к электроприводу, но тесно связанного с технологическими механизмами и кинематическими связями.

Эта особенность по существу предопределяет характеристики условий пуска так называемых приводов механизмов с тяжелыми условиями пуска [1].

Существует ряд порой противоречащих друг другу подходов к созданию систем электропривода с тяжелыми условиями пуска. Одно из них заключается в том, что в системах привода на стадии проектирования комплектуются свойства формирования специальных характеристик, обеспечивающих основные требования к электромеханической системе как в период трогания, так и при традиционном пуске. Следует отметить при этом одно весьма важное обстоятельство: создание системы привода, обеспечивающей все требования по троганию и пуску, неизбежно приводит к значительному росту установленной мощности как двигательного, так и преобразовательного оборудования (последнее касается систем регулируемого электропривода).

Второе решение полностью учитывает специфику проблем трогания и пуска и заключается в том, что традиционная система электропривода (регулируемого или нерегулируемого) снабжается дополнительным пусковым устройством, с помощью которого реализуются основные проблемы первой фазы процесса пуска – трогания системы. С помощью системы, предназначенной для трогания непосредственно реализуется ряд вопросов, определяющих задачу технологического трогания. Кроме этого с помощью таких систем могут реализоваться важные сервисные функции электромеханических систем – их пошаговые перемещения для реализации операций техосмотра целого ряда технологических механизмов. Следует отметить, что шаговые системы, пошаговые перемещения наиболее полно и просто реализовать в электроприводах с синхронными двигателями – наиболее распространенным электроприводом механизмов большой мощности. К их числу можно отнести электроприводы рудоразмольных мельниц горно-обогатительных предприятий, фабрик по первичной подготовке сырья для цементной промышленности, строительной индустрии; насосных агрегатов по перекачке загрязненных жидкостей, нефтепродуктов и др.

Исследователями достаточно полно рассматриваются вопросы управления моментом в период пуска двигателя, как и особенности работы асинхронных машин при нулевой частоте (динамическое торможение), а также в области ультранизких частот. Определены возможности получения максимально-возможного момента при допустимой токовой перегрузке обмоток статора [1, 2]. Достаточно объективных исследований поведения синхронного возбужденного двигателя при формировании максимально-возможного момента при трогании, а также в режиме шаговых перемещений, по существу нет.

Цель работы. Целью исследования является анализ возможных схемных решений для трогания синхронного возбужденного двигателя с использованием специальных (дополнительно вводимых) пусковых устройств для реализации операции трогания.

Материалы и результаты исследований. В неподвижном состоянии возбужденный синхронный двигатель создает момент, зависящий от м.д.с. системы статорных обмоток и магнитодвижущей силы обмотки ротора

$$M = K_M \cdot F_c \cdot F_p \cdot \sin \psi, \quad (1)$$

где F_c , F_p – м.д.с. статора и ротора; K_M – конструктивный коэффициент момента двигателя; ψ – электрический угол рассогласования между м.д.с. статора и статорных обмоток, включенных звездой (рис. 1).

Схема (а) соответствует известной схеме вентильного двигателя, питающегося от сети переменного тока через выпрямитель В. Вентильные элементы (1 – 6) – тиристоры или транзисторные сборки. Коммутация вентилей в определенной последовательности осуществляется с помощью выпрямителя В, а при использовании транзисторных ключей – путем их включения и выключения. Диаграммы переключения вентилей мостового преоб-

разователя приведены на рис. 2, а, где цифрами обозначены интервалы времени, когда включены вентили 1, 2, 3 анодной и 5, 6, 4 – катодной вентиляльных групп. Каждый из вентиля находится в работе треть периода повторяемости процессов $T/3$. Интервалы времени τ_3 , соответствуют переключению соответствующих вентилях – их коммутации. В простейших случаях, когда рассматривается мгновенная коммутация $\tau_3 = 0$. Это наблюдается при искусственной коммутации, хотя идеальной мгновенной коммутации вообще нет. На приведенном рисунке заштрихованными областями обозначены интервалы не попарной работы вентилях в анодной и катодной группах, а работы по три вентиля: два в анодной группе и один в катодной (и наоборот). Цифрами 1, 6, 2 (цифры в выделенных областях на рис. 2, а) обозначают одновременную работу первого и второго вентилях в анодной группе и шестого – в катодной. Одновременная работа двух вентилях в одной из групп возможна по той причине, что скорость вала двигателя в рассматриваемом случае равна или близка к нулю.

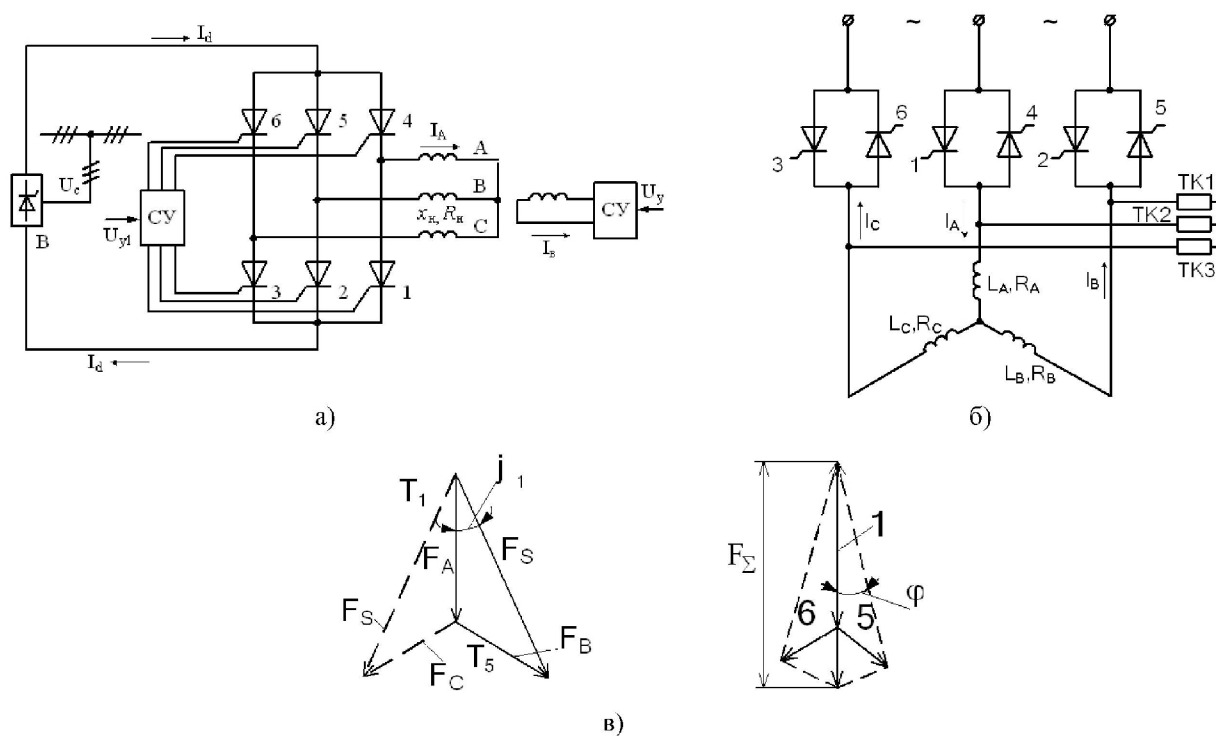


Рис. 1 Схема преобразовательных устройств (а) и (б), диаграммы м.д.с. (в).

Аналогичные режимы возможны и при использовании тиристорного регулятора. Анализ режимов работы такого аппарата может быть выполнен в соответствии с приводимой на рис. 2 диаграммой включения, справедливой как для регулятора на переменном токе, так и для тиристорного мостового преобразователя.

Возможность одновременной работы трех вентилях при трогании имеет не просто познавательное значение, но связана с принципиальным отличием режима 1-1 от режима 2-1. Эта особенность ясна из векторных диаграмм, приведенных на рис. 1. Первая диаграмма соответствует включенным вентилям 1 и 5

$$\bar{F}_{\Sigma 1} = \bar{F}_A + \bar{F}_B = F_A \left(2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi_1 \right), \quad \varphi_1 = \frac{\pi}{6}. \quad (2)$$

При включенных вентилях 1 и 6:

$$F'_{\Sigma 2} = \bar{F}_A + \bar{F}_C = F_A \left(2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi_2 \right), \quad \varphi_2 = -\frac{\pi}{6}. \quad (3)$$

Таким образом, переключение вентиля 5 на вентиль 6 приводит к повороту вектора м.д.с. на величину:

$$\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\pi}{3}. \quad (4)$$

Система вентилях позволяет получить 6 комбинаций, обеспечивающих скачкообразный поворот вектора м.д.с. статора на полный оборот, т.е. на 2π .

случае включения вентилях 1, 5 или 1, 6.

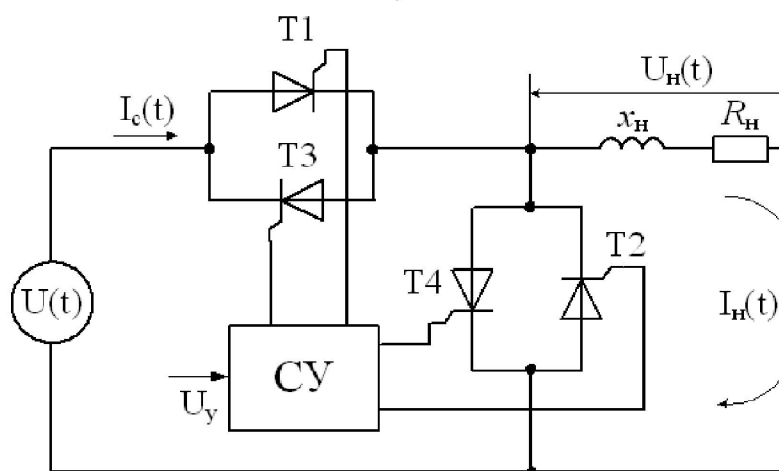
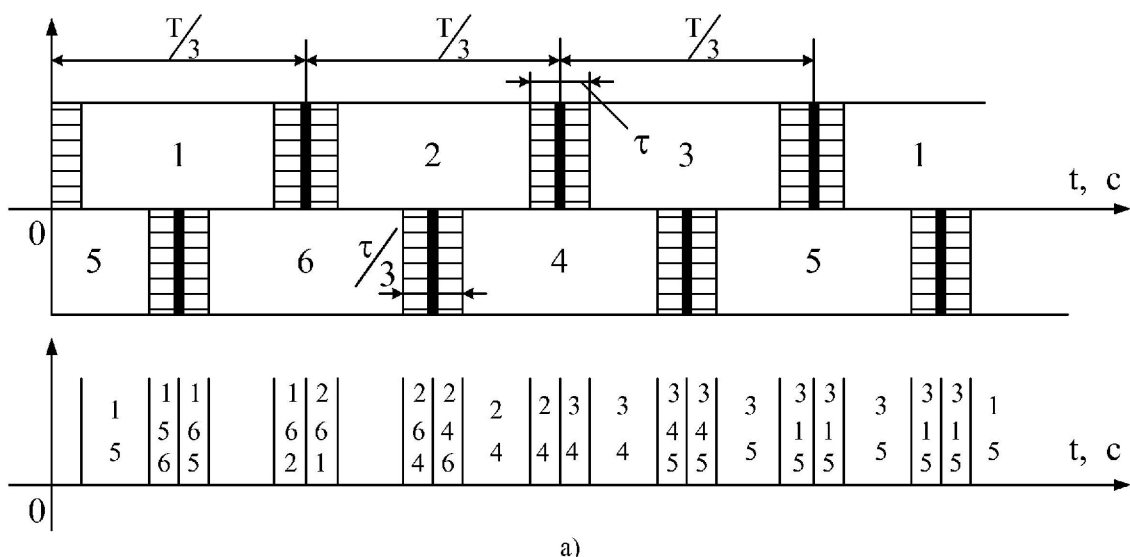


Рис. 2 Диаграммы управления тиристорными ключами (а), схема элемента с шунтирующими вентилями (б).

При втором методе управления, отличающимся от рассмотренного тем, что поочередно осуществляются коммутации то схем 1-1, 1-2, 1-1, т.е. двухвентильная коммутация чередуется с трехвентильной. Как следует из рис. 1, в, включение вентилях 1, 5, 6 позволяет обеспечить поворот вектора м.д.с. на $\Delta\varphi = \frac{\pi}{6}$ по сравнению со

Поворот вектора м.д.с. на $\frac{\pi}{6}$ позволяет получить 12 фиксированных положений вектора м.д.с. на интервале 2π .

Это равносильно увеличению эквивалентного числа пар полюсов статора по сравнению с числом пар полюсов, заложенных в конструкцию машины.

При этом подчеркиваем, что эквивалентного увеличения числа пар полюсов добиваются самым простым путем – изменением алгоритма управления вентилями.

Положительный результат, достигаемый при этом, заключается в следующем:

- снижение возможного угла поворота поля статора создает более благоприятные условия для отработки минимального фиксированного угла поворота ротора при формировании дискретных перемещений;
- распределение токов между большим числом фаз и вентилях улучшает тепловой режим двигателя, т.е. обеспечивает повышенную токовую нагрузку двигателя при трогании.

Первое замечание, касающееся улучшения кинематических режимов, обусловлено следующим: момент синхронного двигателя в стационарном режиме равен произведению тока системы статорных обмоток на ток возбуждения

$$M_{дв} = K_M \cdot I_B \cdot I_c \cdot \sin \vartheta,$$

где K_M - коэффициент момента, учитывающий обмоточные данные двигателя и конструкцию двигателя; ϑ - угол между осями магнитных систем.

Если предположить, что в момент $t = 0 \vartheta = 0$, то момент двигателя $M_{дв} = 0$.

При формировании минимального шага поля статора $\vartheta_i = \frac{\pi}{3}$ (при традиционной системе управления) и $\vartheta_i = \frac{\pi}{6}$ – при анализируемом способе.

В случае фиксированных значений I_B и I_C момент трогания в первом случае будет $M_i = K_M \cdot I_B \cdot I_C \cdot \sin \frac{\pi}{3}$, а во втором $M_j = K_M \cdot I_B \cdot I_C \cdot \sin \frac{\pi}{6}$. Следовательно $M_i = M_j \cdot \sqrt{3}$. Это значит, что при трогании ударное значение момента в предлагаемом способе управления почти вдвое ниже, чем при традиционном способе. Соответствующие толчки момента будут наблюдаться и при других взаимных положениях магнитных осей статорных обмоток и м.д.с. ротора.

Внимание, которое уделяется этому вопросу не случайно, так как режимы работы конструкции при трогании в полной мере соответствуют индукторному двигателю с возбужденным ротором (отношение эквивалентного числа пар полюсов статора и ротора при этом равно 2:0).

Расчетная схема формирования режима трогания представлена на рис. 2, б, а линейные диаграммы при формировании тока системы фазных обмоток – на рис. 3 а и б. Линейные диаграммы рис. 3, а соответствуют включенным тиристорам T_1 и T_3 (шунтирующий контур из тиристоров T_4 и T_2 при этом не функционирует). Угол управления тиристора T_1 соответствует значению ψ . Длительность протекания тока через вентиль λ . Напряжение на нагрузке при этом $U(t)$, а ток $I(t)$. Если положить неизменность значения ψ во времени, то ток нагрузки $I(t)_{II}$ при этом будет иметь форму $I(t)$, представленную на рис. 3, а. В пределах одного периода зависимость $I(t)$ будет иметь вид [1]:

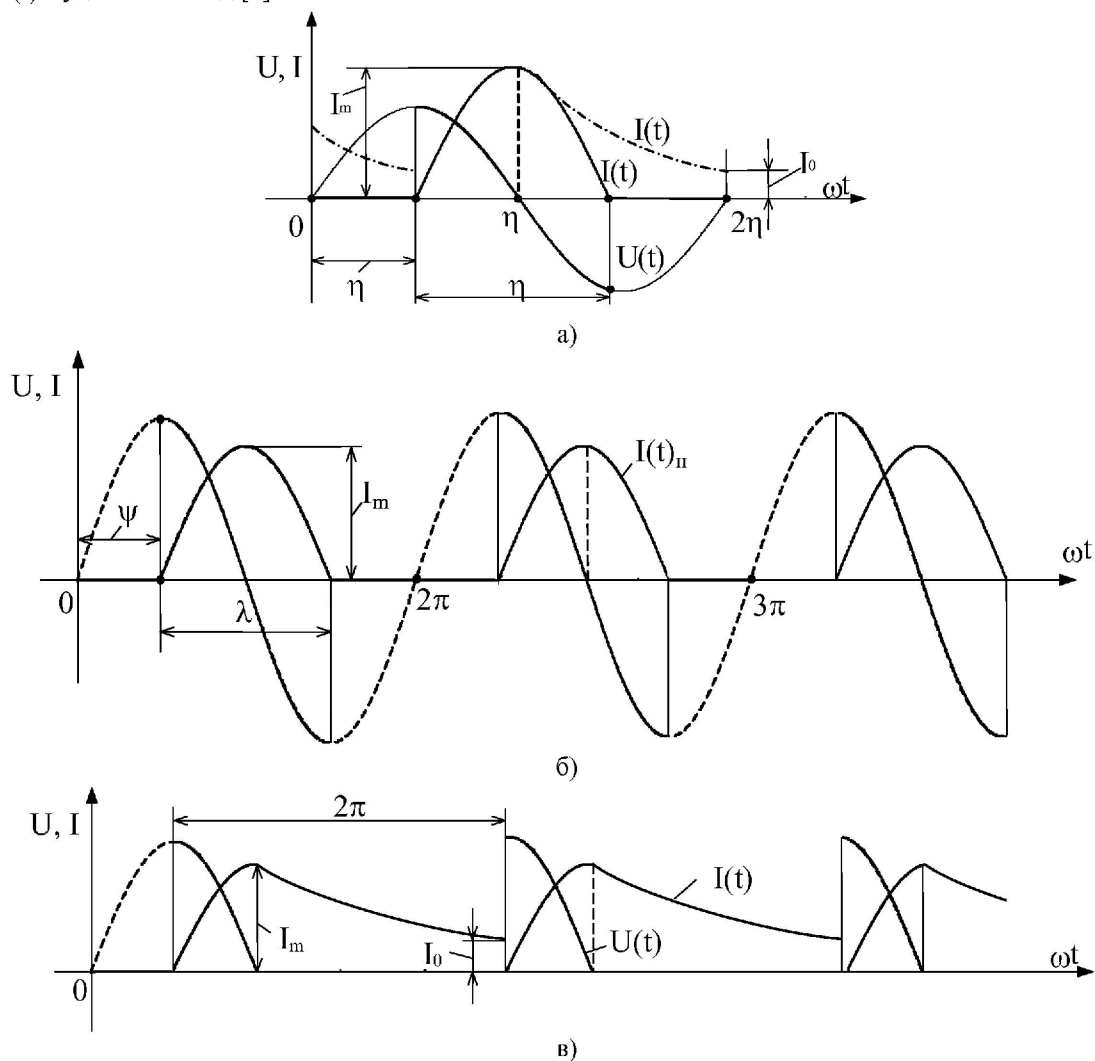


Рис. 3 Линейные диаграммы управления: без шунтирующего вентиля (б), с шунтирующим вентиляем (в).

$$I(t) = \frac{U_m}{Z} \left[\sin(\Omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (5)$$

где $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L_{II}}{R_{II}}$; $\tau = \frac{L_{II}}{R_{II}}$; $Z = \sqrt{R_{II}^2 + \omega^2 L_{II}^2}$; U_m - амплитуда питающего напряжения. При этом справедливо

$$\begin{aligned} \dot{I}(f) &= 0, \text{ при } t_{\psi} \geq t \geq 0; \\ \dot{I}(f) &> 0, \text{ при } t_{\psi} + \lambda \geq t \geq t_{\psi}; \\ \dot{I}(f) &= 0, \text{ при } \frac{2\pi}{\omega} \geq t \geq t_{\psi} + \lambda. \end{aligned} \quad (6)$$

Анализ линейных диаграмм рис. 3, а показывает, что при $\omega t > \pi$ ток $I(t)$ достигает максимума I_m , а при $\omega t > \psi + \lambda$ становится равным нулю. Отрицательные значения $U(t)$ при положительных значениях $I(t)$ означают, что в этом случае происходит возврат запасенной электромагнитной энергии в сеть. Это является причиной того, что $I(t)$ носит прерывистый характер.

Это явление непосредственно связано с уменьшением среднего значения тока, т.е. развиваемого двигателем момента. Неблагоприятные факторы проявляются и том, что прерывистый характер тока определяет и переменную составляющую момента.

Наличие шунтирующего вентиля (рис. 2, б) существенно улучшает режим формирования тока статора и момента двигателя при трогании. Кривые тока в статорной обмотке представлены на рис. 3, в. Зависимость тока от времени может быть представлена таким образом:

$$\begin{aligned} I(t) &> 0, \text{ если } \frac{\pi}{\omega} \geq t \geq t_{\psi}; \\ I(t) &= I_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ если } \frac{\pi}{3} + t_{\psi} \geq t > 0; \\ I(t) &= I_0, \text{ если } t = \frac{\pi}{\omega} + t_{\psi}. \end{aligned} \quad (7)$$

Шунтирующий вентиль может быть включен в момент перехода напряжения через нуль. Электромагнитная энергия, запасенная в обмотках, уменьшается вследствие уменьшения тока по экспоненциальному закону. По этой причине ток в обмотке статора приобретает непрерывный характер, причем среднее и эффективное значения его существенно возрастают. По этой причине необходимые значения токов в обмотках формирования момента достигаются при существенно меньших уровнях питающего напряжения. Существенно снижаются уровни гармоник тока статора и переменная составляющая момента.

После поворота ротора двигателя на полюсное деление включается следующая комбинация вентиля, с помощью которой обеспечивается поворот ротора на следующий шаг. Шунтирующие тиристоры вводятся в схему устройства трогания в форме ключей ТК1, ТК2, ТК3 с алгоритмом управления, адаптированным к тиристорному регулятору. Эффективность введения буферного тиристорного регулятора иллюстрируется кривыми тока в цепи статорного синхронного двигателя со следующими параметрами: цепь статора – сопротивление $R_1 = 1,35$ Ом, индуктивность $L_1 = 8$ мГн, взаимная индуктивность $R_{\mu} = 1,0$ Ом; $L_{\mu} = 27$ мГн; демпферная обмотка $R_d = 1,2$ Ом, $L_d = 7,3$ мГн. Соответствующие кривые тока представлены на рис. 4. Из приведенных кривых видно, что наряду с непрерывным характером тока при наличии шунтирующих вентиля существенно растет среднее значение тока.

Коэффициент искажения тока при этом уменьшается почти вдвое – с 0,41 до 0,68.

С учетом сказанного можно сделать следующие выводы:

- трогание синхронного возбужденного двигателя может быть осуществлено с использованием трех возможных схем: тиристорных преобразователей со специальными законами коммутации; тиристорных преобразователей с искусственным гашением вентилях напряжением выпрямителя; тиристорных регуляторов напряжения;
- улучшением режимов трогания осуществимо при искусственном увеличении числа фаз статора путем использования специальных алгоритмов управления вентилями;
- в схемах с тиристорными регуляторами оправдано применение дополнительных буферных регуляторов, обеспечивающих работу основного регулятора в режиме однофазного выпрямителя с шунтирующим вентилем;
- в схемах предпускового трогания целесообразно применение бесконтактных сенсоров положения ротора.

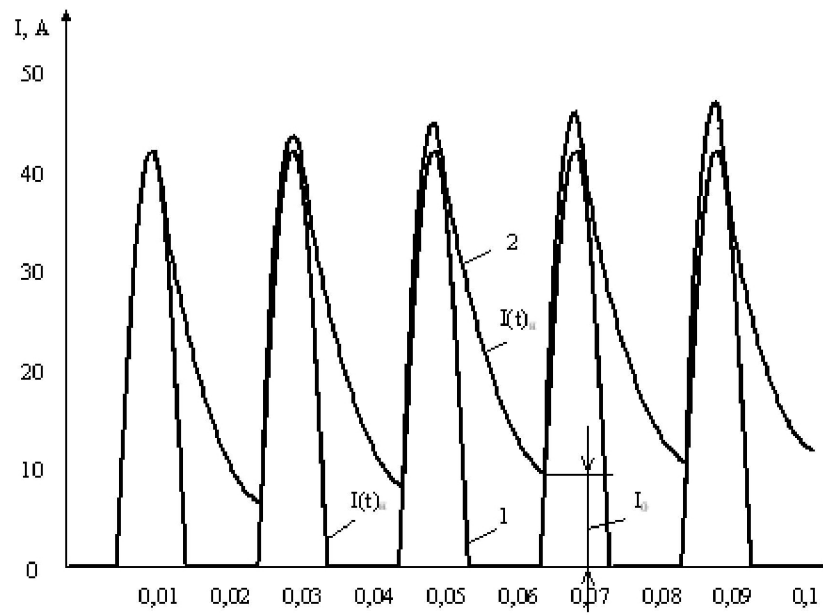


Рис. 4 Кривые тока статорной обмотки при $\alpha = \frac{\pi}{2}$: 1 – без шунтирующего вентиля; 2 – с шунтирующим вентилем. Средние значения токов 11,5 и 21 А соответственно; напряжение питания 0,4 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Такеути Т.Д. Теория применения вентильных цепей для регулирования двигателей. Л, Энергия, 1973 с. 248.
2. Чиликин М.Г., Ключев В.И. Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода, Энергия, 1979, с 616.