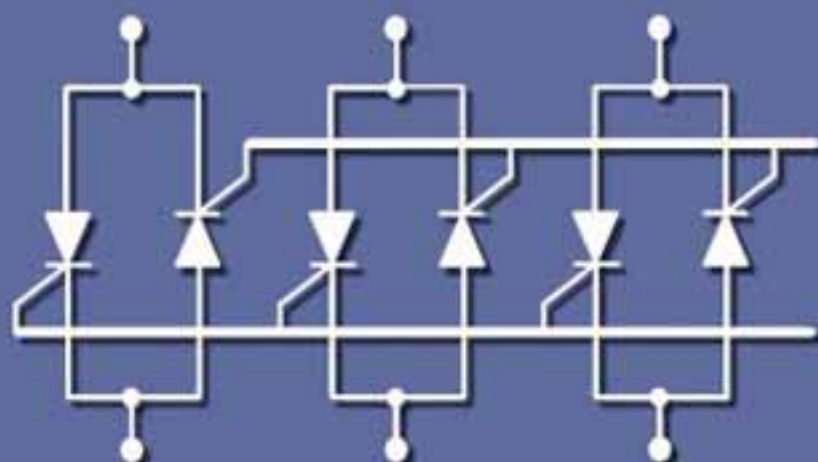


А. В. Клевцов

БЕСКОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



УДК 621.3
ББК 31
К 48

ФЗ
№436-ФЗ

Издание не подлежит маркировке
в соответствии с п. 1 ч. 4 ст. 11

Клевцов А. В.

К 48 Бесконтактные устройства пуска и торможения электродвигателей. Учебное пособие. / А. В. Клевцов. – М.: Инфра-Инженерия, 2018. – 188 с.
ISBN 978-5-9729-0200-2

В связи с интенсивным развитием в последние годы промышленного производства изделий силовой электроники, стало возможным создание целой гаммы бесконтактных устройств, обеспечивающих запуск и торможение асинхронных электродвигателей в условиях значительного снижения негативных явлений, присущих использованию традиционной электромеханической аппаратуры.

Как правило, прилагаемые руководства по эксплуатации содержат достаточные сведения для подключения, запуска и инициализации устройств, но для проведения надлежащего выбора их конфигурации и оценки функциональных возможностей применительно к конкретному применению, определения режима работы, анализа сбойных и аварийных ситуаций, диагностики и ремонта - этой информации недостаточно.

Это пособие призвано, в определенной мере, восполнить дефицит регулярной и интегрированной информации по сложившемуся направлению в приводной технике, особенно, для той прослойки специалистов, которые заняты проектированием электрооборудования технологических комплексов, техническим обслуживанием и ремонтом действующего оборудования. Немалая часть книги посвящена описанию принципов работы бесконтактных устройств от простейших коммутаторов нагрузки до достаточно сложных интеллектуальных устройств плавного пуска. Подробно затронуты вопросы применения в промышленном оборудовании и коммунальной сфере, включая методику выбора и оценки эффективности использования.

Пособие может быть использовано студентами технических университетов при курсовом и дипломном проектировании, а также специалистами электротехнического профиля эксплуатационных служб предприятий различных отраслей промышленности.

© Клевцов А. В., автор, 2018

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2018

ISBN 978-5-9729-0200-2

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СИЛОВЫХ ПРИБОРОВ В СТАТОРНЫХ ЦЕПЯХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Не затрагивая пока вопроса о структуре силовых цепей бесконтактных устройств, отметим, что основными силовыми коммутирующими элементами являются серийно выпускаемые тиристоры и симисторы в сочетании с диодами.

На *рис.1* приведены варианты наиболее распространенных схем однофазных коммутирующих элементов, используемых при построении силовых блоков.

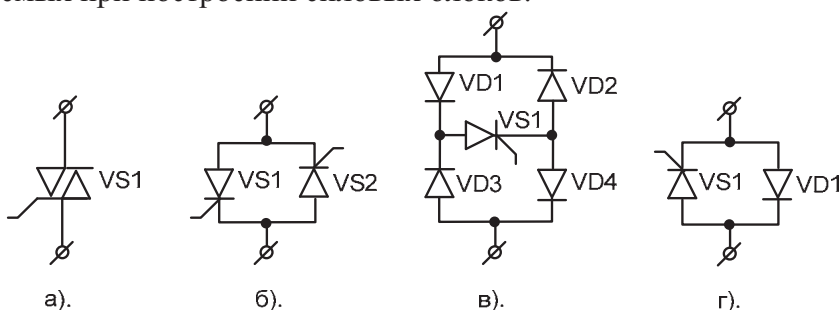


Рис. 1

Схемы коммутирующих элементов (КЭ) (*рис.1, а и рис.1, б*) используются при любой силовой схеме подключения статорных обмоток асинхронных электродвигателей и являются основой для построения большинства бесконтактных пусковых устройств. Отличие их в том, что в схеме *рис.1, а* в качестве коммутирующего элемента используется симистор, который при синусоидальном токе в нагрузке коммутирует две полуволны питающего напряжения, рассеивая тепловую энергию одним корпусом. В схеме *рис.1, б* на каждом из тиристоров выделяется лишь половина мощности,

обусловленная падением напряжения при поочередном пропуске тока нагрузки в течение 180° . Благодаря этому обстоятельству, в самых современных мощных устройствах, включая УПП, обычно используется схема *рис.1,б*.

Вариант схемы *рис.1,в* характерен тем, что через тиристор VS1 протекает полный ток нагрузки, также как в схеме *рис.1,а*.

Среднее значение тока нагрузки для КЭ (*рис.1, а, б, в*) определяется как:

$$I_{cp_n} = \frac{1}{\pi} \int I_m \sin wtdt = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,9 I_n, \quad (1)$$

где:

I_m — амплитудное значение тока нагрузки;

I_n — действующее значение тока нагрузки.

Для схем *рис.1,а* и *рис.1,в* среднее значение тока нагрузки равно среднему значению тока через тиристор (симистор):

$$I_{cp_n} = I_{cp_T} = I_{cp_c} = 0,9 I_n, \quad (2)$$

В схеме *рис.1,б* средний ток тиристора равен половине среднего значения тока нагрузки, то есть:

$$I_{cp_T} = \frac{I_{cp_n}}{2} = 0,45 I_n, \quad (3)$$

Что касается крайне редко используемой схемы *рис.1,г*, то среднее значение тока тиристора, как и в случае *рис.1,б*, равно:

$$0,45 I_n.$$

Условимся, что при дальнейшем рассмотрении ряда особенностей работы КЭ в статорных цепях асинхронного двигателя (АД), все рассуждения относятся к наиболее применяемой и классической схеме *рис.1,б*.

Очевидно, что включение тиристорov в статорную цепь, позволяет в общем случае реализовать две функции управления:

- производить бесконтактную коммутацию силовой цепи, без какого либо ограничения числа циклов включения / выключения нагрузки;
- осуществлять регулирование уровня напряжения на обмотках АД.

Рассмотрим, какие явления сопровождают выполнение указанных функций при коммутации и управлении с помощью тиристорov силовой цепью с активно-индуктивной нагрузкой соответствующей фазы АД (*рис.2,а*). Регулирование напряжения на нагрузке позволяет применительно к АД получить ряд регулировочных характеристик и обеспечить энергоэкономичные пуско-тормозные режимы работы приводного устройства.

Как известно, изменение напряжения на нагрузке достигается за счет использования фазового управления, которое заключается в изменении угла открывания тиристора α , отчет которого производится от момента прохождения фазного питающего напряжения сети через нуль (*рис.2,б*).

В данном случае налицо режим параметрического управления АД, при котором варьируется в определенных пределах значение приложенного к обмотке статора напряжения, от уровня которого зависит вид механических характеристик.

Задача аналитического определения напряжения, питающего статорную обмотку АД, при современных возможностях аппаратно-программных средств, в настоящее время не является проблемной, особенно, если используются такие уже общедоступные прикладные программы, как, например, пакет Simulink, входящий в состав расширенной версии системы MATLAB.

Тем не менее, разработка алгоритмов управления и программ на их основе для встроенных микроконтроллеров бесконтактных устройств опирается в зависимости от назначения и функциональности, на два базовых направления:

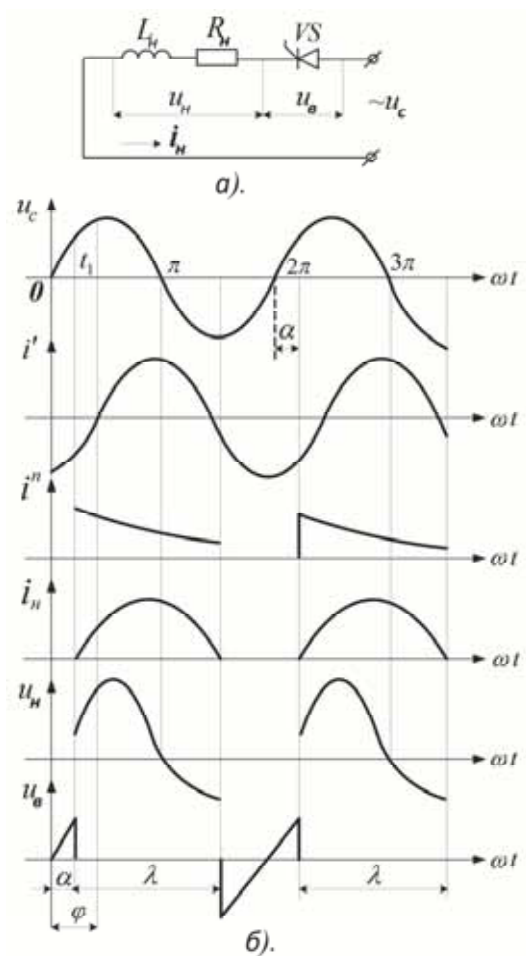


Рис. 2

а) формирование режимов работы АД за счет точной установки и последующего формирования необходимого изменения напряжения на статорной обмотке, согласуясь с характеристиками нагрузки. При этом учитывается взаимная связь между фазами при непрерывном изменении скольжения, влияющая на характер электромагнитных процессов. Такое управление АД в переходных режимах (коммутация, разгон/торможение) связано с решением в реальном времени си-

системы нелинейных дифференциальных управлений, отражающих функционирование системы «бесконтактное устройство – асинхронный двигатель»;

б) управление режимами работы АД на базе упрощенного метода, в основе которого модель работы управляемых силовых приборов на активно-индуктивную нагрузку, которая представляется специфической трехфазной активно-индуктивной нагрузкой, когда значения активного и индуктивного сопротивлений фазы зависят от частоты вращения ротора.

Первое направление ранее использовалось только для глубокого исследования режимов работы тиристорных преобразователей напряжения (ТПН), но с появлением мощных аппаратно-программных средств (высокопроизводительных микроконтроллеров, промышленных компьютеров, развитого инструментального программного обеспечения и т. д.) стала возможной реализация уточненных алгоритмов управления пускотормозными режимами АД благодаря решению системы дифференциальных уравнений [1] в обобщенной вращающейся трехфазной системе координат в относительных единицах:

$$u'_{ca} = r_c i'_{ca} + \frac{d}{d\tau} \Psi'_{ca} + \frac{\omega_\kappa}{\sqrt{3}} (\Psi'_{cc} - \Psi'_{cv}); \quad (4)$$

$$u'_{cv} = r_c i'_{cv} + \frac{d}{d\tau} \Psi'_{cv} + \frac{\omega_\kappa}{\sqrt{3}} (\Psi'_{ca} - \Psi'_{cc}); \quad (5)$$

$$u'_{cc} = r_c i'_{cc} + \frac{d}{d\tau} \Psi'_{cc} + \frac{\omega_\kappa}{\sqrt{3}} (\Psi'_{cv} - \Psi'_{ca}); \quad (6)$$

$$u'_{pa} = r_p i'_{pa} + \frac{d}{d\tau} \Psi'_{pa} + \frac{\omega_\kappa - \omega}{\sqrt{3}} (\Psi'_{pc} - \Psi'_{pv}); \quad (7)$$

$$u'_{pv} = r_p i'_{pv} + \frac{d}{d\tau} \Psi'_{pv} + \frac{\omega_\kappa - \omega}{\sqrt{3}} (\Psi'_{pa} - \Psi'_{pc}); \quad (8)$$

$$u'_{pc} = r_p i'_{pc} + \frac{d}{d\tau} \Psi'_{pc} + \frac{\omega_\kappa - \omega}{\sqrt{3}} (\Psi'_{pv} - \Psi'_{pa}); \quad (9)$$

$$\Psi'_{ca} = L_c i'_{ca} + M_c i'_{cv} + M_c i'_{cc} + M i'_{pa} - \frac{1}{2} M i'_{pv} - \frac{1}{2} M i'_{pc}; \quad (10)$$

$$\Psi'_{cv} = L_c i'_{cv} + M_c i'_{ca} + M_c i'_{cc} + Mi'_{pv} - \frac{1}{2} Mi'_{pa} - \frac{1}{2} Mi'_{pc}; \quad (11)$$

$$\Psi'_{cc} = L_c i'_{cc} + M_c i'_{ca} + M_c i'_{cv} + Mi'_{pc} - \frac{1}{2} Mi'_{pa} - \frac{1}{2} Mi'_{pv}; \quad (12)$$

$$\Psi'_{pa} = L_p i'_{pa} + Mi'_{ca} - \frac{1}{2} Mi'_{cv} - \frac{1}{2} Mi'_{cc} + M_p i'_{pv} + M_p i'_{pc}; \quad (13)$$

$$\Psi'_{pv} = L_p i'_{pv} + Mi'_{cv} - \frac{1}{2} Mi'_{ca} - \frac{1}{2} Mi'_{cc} + M_p i'_{pa} + M_p i'_{pc}; \quad (14)$$

$$\Psi'_{pc} = L_p i'_{pc} + Mi'_{cc} - \frac{1}{2} Mi'_{ca} - \frac{1}{2} Mi'_{cv} + M_p i'_{pa} + M_p i'_{pv}; \quad (15)$$

где:

$u'_{ca}, u'_{cv}, u'_{cc}$ — приведенные к вращающейся системе координат, мгновенные значения напряжений фаз статора;

$i'_{ca}, i'_{cv}, i'_{cc}$ — приведенные к вращающейся системе координат, мгновенные значения токов фаз статора;

$\Psi'_{ca}, \Psi'_{cv}, \Psi'_{cc}$ — приведенные к вращающейся системе координат, мгновенные значения потокосцепления фаз статора;

$u'_{pa}, u'_{pv}, u'_{pc}$ — приведенные к вращающейся системе координат, мгновенные значения напряжений фаз ротора;

$i'_{pa}, i'_{pv}, i'_{pc}$ — приведенные к вращающейся системе координат, мгновенные значения токов фаз ротора;

$\Psi'_{pa}, \Psi'_{pv}, \Psi'_{pc}$ — приведенные к вращающейся системе координат, мгновенные значения потокосцепления фаз ротора;

L_c — индуктивность фазы статора;

L_p — индуктивность фазы ротора;

M — взаимная индуктивность между фазами статора и ротора;

M_c — взаимная индуктивность фаз статора;

M_p — взаимная индуктивность фаз ротора;

r_c — активное сопротивление фазы статора;

r_p — активное сопротивление фазы ротора;
 ω_k — угловая частота вращения трехфазной обобщенной системы координат;
 ω — угловая частота вращения ротора;
 τ — время, выраженное в относительных единицах.

В этом случае, управляющая программа позволяет:

- рассчитать механическую характеристику по заданным условиям разгона и торможения;
- достаточно точно определить гармонический состав напряжения питания АД;
- обеспечить функционирование устройства плавного пуска с адаптивным алгоритмом управления параметрами АД во время разгона;
- осуществить эффективную настройку устройства под конкретную нагрузку АД.

Для более простых в функциональном отношении бесконтактных устройств пуска и торможения используются управляющие программы, разработанные на основе модели представления фаз АД в виде специфической активно-индуктивной нагрузки (2^{oe} направление), не позволяющей в полной мере отразить реально происходящие процессы в АД, так как не учитывается влияние взаимоиндукции между фазами обмоток статора и ротора.

При подаче синусоидального напряжения на фазу АД, представленную на *рис.2,а*, уравнение цепи имеет вид:

$$u_{\varepsilon} + i_n R_n + L_n \frac{di_n}{dt} = U_m \sin \omega t \quad \text{или} \quad u_{\varepsilon} + u_n = u_c \quad (16)$$

где:

u_{ε} — падение напряжения на тиристоре;
 u_n — напряжение на нагрузке;
 u_c — приложенное мгновенное напряжение в цепи;
 i_n — ток нагрузки;
 L_n — индуктивность нагрузки;
 R_n — активное сопротивление нагрузки;

U_m — приложенное амплитудное напряжение в цепи.

Выражение (16) является нелинейным из-за нелинейности вольт-амперной характеристики тиристора и может быть заменено двумя линейными [1]:

$$i_n R_n + L_n \frac{di_n}{dt} = U_m \sin \omega t \quad (17)$$

при $i_n \neq 0$ и прямом падении напряжения на тиристоре $u_\theta \approx 0$ (допущение идеальности прибора).

Очевидно, что при включении из-за наличия индуктивности ток скачком не изменяется [5] и представляется двумя составляющими (рис.2,б):

$$i = i' + i'' , \quad (18)$$

где:

i — ток фазы АД

i' — периодическая составляющая:

$$i' = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) , \quad (19)$$

где:

$$Z — \text{общее сопротивление цепи, } Z = \sqrt{R_n^2 + (\omega L_n)^2} , \quad (19.1)$$

$$\varphi — \text{угол сдвига нагрузки, } \varphi = \arctg \frac{\omega L_n}{R_n} ; \quad (19.2)$$

i'' — аperiodическая (свободная) составляющая:

$$i'' = A e^{-\frac{t}{T}} , \quad (20)$$

где:

A — постоянная интегрирования, определяемая начальными условиями;

T — электромагнитная постоянная фазы АД,

$$T = \frac{L_n}{R_n} \quad (20.1)$$

Учитывая, что $\omega T = \frac{\omega L_n}{R_n} = \frac{X_{L_n}}{R_n} = \operatorname{tg} \varphi$, выражение (20)

примет вид:

$$i'' = A e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\operatorname{tg} \varphi}}, \quad (20.2)$$

где:

α — значение угла управления.

Исходя из выражений (19) и (20.2) окончательное выражение для тока фазы АД примет вид:

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\operatorname{tg} \varphi}}, \quad (18.1)$$

В качестве начальных условий при определении постоянной интегрирования A примем, что $\omega t = \alpha$ и $i = 0$, что соответствует моменту времени t_l (рис.2,б) или появлению тока в фазе:

$$A = -\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \quad (21)$$

Выражения для определения тока в нагрузке имеет вид

$$i_n = \frac{U_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\operatorname{tg} \varphi}} \right] \quad (22)$$

Значение угла проводимости λ , в течение которого в данном полупериоде питающего напряжения протекает ток нагрузки i_n , определяется из трансцендентного уравнения [1]:

$$\sin(\lambda + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\lambda}{\operatorname{tg} \varphi}}, \quad (23)$$

если подставить в уравнение (22) $i_n = 0$ и $\omega t = \lambda + \alpha$.

Из выражений (18.1), (21), (22), (23) очевидно, что значения A и λ зависят от величины угла управления α и угла

сдвига нагрузки φ , следовательно и соотношения между ними. Здесь характерны три случая:

- а) при $\alpha \approx \varphi$ свободная составляющая, практически отсутствует ($i'' = 0$), так как $A = 0$ и угол проводимости $\lambda = 180^\circ$;
- б) при $\alpha < \varphi$, $A > 0$ и $\lambda > 180^\circ$;
- в) при $\alpha > \varphi$, $A < 0$ и $\lambda < 180^\circ$.

На временных диаграммах *рис.2,б* показан случай (вторая кривая), когда угол управления находится в пределах угла нагрузки φ и угол проводимости λ может значительно превысить длительность полупериода питающего напряжения.

Обобщенные выражения для определения мгновенных значений напряжения на фазе АД при однополупериодной схеме (*рис.2,а*) имеют вид:

$$u_n = 0 \quad \text{при} \quad \omega t < \alpha; \quad (24.1)$$

$$u_n = U_m \sin \omega t \quad \text{при} \quad 0 < \omega t < (\alpha + \lambda) \quad (24.2)$$

Так как в реальном бесконтактном устройстве для создания условий коммутации и управления фазой АД используются два встречно включенных тиристора (*рис.3,а*), то рассмотрим некоторые особенности работы и выведем обобщенные выражения, определяющие напряжение на фазе АД при различных значениях α .

На *рис.3,б* иллюстрируется временная диаграмма, когда $\alpha > \varphi$ и, также, как и в предыдущем случае, под нагрузкой понимается фаза АД, представленная в виде последовательно включенных активного и индуктивного сопротивлений.

Как и в предыдущем рассмотрении, характерны три случая:

- а) при $\alpha \approx \varphi$, $A = 0$ и $\lambda = 180^\circ$;
- б) при $\alpha < \varphi$, $A > 0$ и $\lambda > 180^\circ$;
- в) при $\alpha > \varphi$, $A < 0$ и $\lambda < 180^\circ$.

При $\alpha \approx \varphi$, каждый из тиристоров $VS1$ и $VS2$ пропускает ток в течение полупериода питающего напряжения. При отсутствии i'' , каждый тиристор включается точно в тот момент, когда закрывается предыдущий, по нагрузке протекает непрерывный синусоидальный ток, мгновенное значение которого может быть определено из выражения (22):

$$i_n = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) \quad (22.1)$$

Напряжение на нагрузке также синусоидальное (см. формулу 24.2).

Если $\alpha < \varphi$, то угол проводимости каждого тиристора должен быть больше полупериода питающего напряжения (π), что является препятствием к физической реализации такого режима, так как оба тиристора при встречном включении не могут находиться в проводящем состоянии одновременно (открытие очередного тиристора возможно только после закрытия работавшего). При этом, в зависимости от длительности управляющего импульса γ , могут быть реализованы два сценария работы коммутатора (рис.3,а):

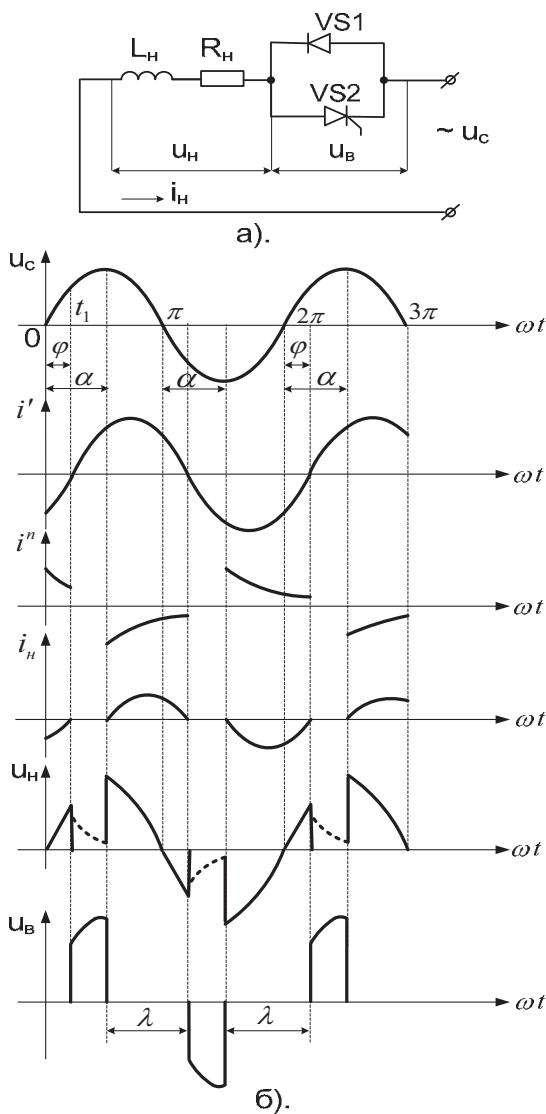


Рис. 3

- при $\gamma < (\varphi - \alpha)$ может работать только один тиристор с углом проводимости $\lambda > 180^\circ$ (работа схемы аналогична ранее рассмотренной на рис. 2, а при $\alpha < \varphi$);

- при $\gamma > (\varphi - \alpha)$ включение тиристоров происходит несколько позднее момента подачи управляющего импульса, начиная с угла открытия, равного φ . В этом случае угол проводимости каждого тиристора будет равен половине периода питающего напряжения $\lambda = \pi$, что полностью соответствует рассмотренным ранее случаям при $\alpha \approx \varphi$.

Таким образом, при использовании схемы (рис.3,а), регулирование напряжения и тока в фазе АД возможно [1] только при условии, если угол управления α изменится в пределах: $\varphi < \alpha < \pi$.

Как видно из временных диаграмм $u_n = f(t)$ и $i_n = f(t)$ на рис.2,б и рис.3,б, фаза АД питается несинусоидальным напряжением, что приводит соответственно к потреблению несинусоидального прерывистого тока из сети, гармонический состав которого полностью зависит от значений α и φ .

Для оценки механических характеристик и основных энергетических показателей привода необходимо иметь информацию о гармоническом составе тока, особенно, о весе первой гармоники тока, определяющей момент на валу АД. Кроме этого, знание гармонического состава тока позволяет вычислить действующее и среднее значения несинусоидального тока, что в конечном итоге дает возможность произвести разработку экономичной конструкции силовой части бесконтактного пускового устройства.

Такие обширные вопросы, как определение гармонического состава токов и напряжения при тиристорном управлении, методы расчета статических характеристик АД при несинусоидальном токе в обмотках статора, учет влияния гармоник тока на регулируемую намагничивающую силу, а, следовательно, и на момент двигателя, составляют отдельную тему и в полной мере не могут быть изложены в настоящем издании. Тем не менее, отметим следующие моменты:

а) При протекании в обмотках статора АД трехфазного несинусоидального тока [6], каждая гармоника тока по каж-

дой из осей обмоток создает свою импульсную намагничивающую силу (НС) или пространственную гармонику НС с номером n .

Если обмотки АД сдвинуты в пространстве относительно друг друга на электрический угол $\pm \frac{2\pi}{3}$, то для каждой пространственной гармоники с номером n угол сдвига составит $\pm n \frac{2\pi}{3}$. В свою очередь, гармоники тока в обмотках сдвинуты по фазе относительно тока в обмотке фазы A на угол $\pm k \frac{2\pi}{3}$, где k – номер гармоники тока, создающий соответствующую пространственную гармонику НС с номером n .

б) Если предположить что магнитная цепь АД не насыщена, то применяя принцип наложения, можно определить характер результирующей намагничивающей силы. Известно, что при питании трехфазной обмотки АД симметричной системой несинусоидальных токов, вероятны, в общем случае, четыре ситуации:

- амплитуда прямой волны результирующего поля

$$F_{nk\Sigma} = \frac{3}{2} F_{nkt}, \text{ амплитуда обратной волны равна нулю, где } F_{nk\Sigma} = F_{\lambda nk} + F_{\text{внк}} + F_{\text{снк}}$$

является векторной суммой намагничивающих сил фаз А, В, С;

- амплитуда прямой волны равна нулю, амплитуда обратной волны равна $\frac{3}{2} F_{nkt}$;

- амплитуды обеих волн равны нулю;

- амплитуды обеих волн равны $\frac{3}{2} F_{nkt}$ (эффект пульсирующего поля).

в) Гармонический состав напряжений, питающих электродвигатель в режиме прерывистого тока (рис.2, б и рис.3, б)

можно реально определить, используя известный программный пакет расширения Matlab «Symbolic Math», позволяющий производить интегральные преобразования Фурье, составляющие на сегодняшний день наиболее эффективный инструмент для осуществления спектрального анализа электрических цепей.

Из временных диаграмм на *рис.2,б* и *рис.3,б* видно, что кривые напряжений и токов представляют собой функции, симметричные относительно оси абсцисс, то есть соответствующих $f(x) = -f(x + \pi)$.

В общем случае, несинусоидальная периодическая функция изменения прерывистого тока фазы АД $f(i_n)$ может быть представлена рядом Фурье в виде:

$$f(i_n) = \frac{a_0}{2} + \sum_{\kappa=1}^{\infty} a_{\kappa} \cos \kappa i_n + \sum_{\kappa=1}^{\infty} b_{\kappa} \sin \kappa i_n = \frac{a_0}{2} + \sum_{\kappa=1}^{\infty} A_{\kappa} \sin(\kappa i_n + \Psi_{\kappa}), \quad (25)$$

где:

κ — порядковый номер гармоники ($\kappa=1,2,3...\infty$);

a_{κ} и b_{κ} — коэффициенты Фурье, их величина определяется:

$$a_{\kappa} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(i_n) \cos \kappa i_n di_n \quad (\kappa=0, 1,2,3...\infty), \quad (26)$$

$$b_{\kappa} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(i_n) \sin \kappa i_n di_n \quad (\kappa=1,2,3...\infty); \quad (27)$$

$$A_{\kappa} = \sqrt{a_{\kappa}^2 + b_{\kappa}^2} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \Psi_{\kappa} = \frac{a_{\kappa}}{b_{\kappa}} \quad (28)$$

г) При построении механических характеристик отсутствует необходимость в определении высших гармоник тока, так как третья гармоника не участвует в создании вращающего момента [8], а влияние последующих гармоник (5,7,11 и т. д.) на уровень вращающего момента ничтожно мало.

СОДЕРЖАНИЕ

От автора	3
Введение	4
Глава 1. О некоторых особенностях функционирования управляемых силовых приборов в статорных цепях асинхронных электродвигателей	5
Глава 2. Структура и принципы построения бесконтактных устройств пуска и торможения электродвигателей	31
2.1. Классификация серийно выпускаемых устройств и принципы их функционирования	31
2.2. Варианты конструктивного исполнения серийных изделий	58
2.3. Основные эксплуатационные параметры и параметры настройки. Их физическая суть и толкование	66
Глава 3. Вопросы применения УПП в промышленном оборудовании и коммунальной сфере	82
3.1. Аспекты применения в типовом оборудовании.....	82
3.2. Схемотехника силовых и управляющих цепей устройств плавного пуска. Краткие сведения об элементной базе	85
3.3. Выбор устройств и оценка эффективности их использования	100
Глава 4. Высоковольтные устройства пуска и торможения	105
Справочные приложения	121
Приложение 1. Устройство плавного пуска серии CSX AuCom	121
Приложение 2. Устройство плавного пуска серии IMS2 AuCom	125
Приложение 3. Устройство плавного пуска серии MVS AuCom	131
Приложение 4. Устройство плавного пуска серии RVS-AX, RVS-BX SOLCON.....	132
Приложение 5. Устройство плавного пуска серии HRVS-DN SOLCON	134
Приложение 6. Устройство плавного пуска серии LH4 Schneider Electric	139
Приложение 7. Устройство плавного пуска серии AXDM Lovato electric	142

Приложение 8. Устройство плавного пуска серии ADX Lovato electric	143
Приложение 9. Устройство плавного пуска серии Altistart 48 Schneider Electric	145
Приложение 10. Устройство плавного пуска серии Altistart 01 Schneider Electric	153
Приложение 11. Устройство плавного пуска серии ASTAT Plus фирмы General Electric	156
Приложение 12. Устройство плавного пуска серии MSD фирмы EMOTRON	157
Приложение 13. Устройство плавного пуска серии ДМС фирм «Веспер»	158
Приложение 14. Устройство пускорегулирующее (Soft starter) фирмы Eldin	159
Приложение 15. Преобразователи переменного напряжения серии ПН-ТПП («СТАРТ-В») ООО «Запорожский завод «Преобразователь»	160
Приложение 16. Пускатели тиристорные типа ПТ ООО «Запорожский завод «Преобразователь».	161
Приложение 17. Устройство плавного пуска серии ASTAT Plus General Electric	162
Приложение 18. Устройство плавного пуска серии TMC-7 TOSHIBA.	163
Приложение 19. Устройство плавного пуска серии TMC-7 TOSHIBA	164
Приложение 20. Устройство плавного пуска серии MCD Danfoss	165
Приложение 21. Устройство плавного пуска серии MCD 100 Danfoss.....	166
Приложение 22. Устройство плавного пуска серии MCD 200	167
Приложение 23. Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-3, 3А.....	171
Приложение 24. Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР- 2М	172

Приложение 25. Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР- 3М	173
Приложение 26. Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР- 3АН	174
Приложение 27. Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-2МП, ПБР-3АП.....	176
Приложение 28. Реверсивные устройства плавного пуска, динамического торможения и защиты серии БиСТАРТ	177
Приложение 29. Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-31	179
Приложение 30. Тиристорные пускатели серии ПТТ	180
Перечень сокращений	181
Список литературы	182