

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ МНОГОШАГОВЫЙ СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

П.Г. Яковенко

Томский политехнический университет

E-mail: pgj75@yandex.ru

*Метод последовательного многошагового синтеза позволяет формировать законы управления позиционными электроприводами во время переходного процесса из оптимальных управлений для малых шагов. Составлен алгоритм перемещения рабочего органа без перегулирования по положению при изменении задания во время переходного процесса. Выход в заданную позицию с любой начальной установившейся скорости выполняется за минимальное время с ограничением координат.*

### Ключевые слова:

Метод, синтез, управления, системы, ограничения координат.

### Key words:

Method, synthesis, control, systems, coordinate restriction.

Важной задачей при проектировании позиционных систем с микропроцессорным управлением является разработка алгоритмов синтеза в реальном масштабе времени, с высокой частотой оптимальных по быстродействию законов с учетом возможного изменения задания на перемещение во время переходного процесса. При супервизорном управлении для выполнения ограничений на рывок, ускорение и скорость следует формировать входное воздействие на электропривод с учетом его предельных динамических возможностей.

Синтез оптимальных по быстродействию управлений позиционными электроприводами с ограничением координат традиционными методами не всегда эффективен. Метод синтеза оптимальных управлений [1] с использованием динамического программирования [2] и имитационного моделирования, принципов «перемены цели» и «ведущего слабого звена» [3] позволяют решить задачу проектирования позиционных систем с микропроцессорным управлением. Он открывает широкие перспективы по разработке алгоритмов синтеза микропроцессорными средствами оптимальных управлений подвижными объектами и технологическими процессами в реальном масштабе времени.

### Ограничения координат комплектных электроприводов

Составление алгоритмов синтеза оптимальных управлений комплектными электроприводами значительно упрощается, если представить координаты системы скорость ( $\omega$ ), ускорение ( $\Delta\omega/\Delta t$ ) и рывок ( $\Delta\omega/\Delta t/\Delta t$ ) в единицах одной размерности. При синтезе управлений с постоянным шагом интегрирования  $\Delta t$  о координатах системы и ограничениях можно судить по перемещениям за шаг.

$$L_{\omega} = \omega \Delta t,$$

$$\Delta L_{\omega} = \Delta\omega \Delta t,$$

$$\Delta(\Delta L)_{\omega} = \Delta(\Delta\omega)\Delta t,$$

где  $\Delta\omega$  – приращение скорости за шаг, соответствующее ускорению;  $\Delta(\Delta\omega)$  – приращение к приращению скорости за шаг, соответствующее рывку.

Ограничения на скорость, ускорение и рывок определяются через максимальные значения перемещений за шаг

$$L_{\omega_m} = \omega_m \Delta t,$$

$$\Delta L_{\omega_m} = \Delta\omega_m \Delta t,$$

$$\Delta L_{\omega_{\text{ог}}} = \Delta(\Delta\omega)_m \Delta t,$$

где  $\omega_m$  – максимальная скорость электропривода;  $\Delta\omega_m$  – максимальное приращение скорости за шаг интегрирования, соответствующее максимальному ускорению;  $\Delta(\Delta\omega)_m$  – максимальное приращение к приращению скорости за шаг интегрирования, соответствующее максимальному рывку.

Для  $i$ -го шага интегрирования легко определить перемещения, которые характеризуют ускорение и скорость электропривода при рывке  $\Delta(\Delta L)_{\omega(i)}$

$$\Delta L_{\omega(i)} = \Delta L_{\omega(i-1)} + \Delta(\Delta L)_{\omega(i)},$$

$$L_{\omega(i)} = L_{\omega(i-1)} + \Delta L_{\omega(i)},$$

где  $\Delta L_{\omega(i-1)}$ ,  $L_{\omega(i-1)}$  – перемещения, соответствующие значениям ускорения и скорости электропривода на предыдущем шаге.

Разгон электропривода до заданной скорости при наличии ограничений на рывок и ускорение в общем случае состоит из участка нарастания ускорения, участка движения с предельным ускорением и участка уменьшения ускорения. Участок движения с предельным ускорением может отсутствовать, если начинать уменьшение ускорения раньше, чем система достигнет предельного темпа разгона. Значение скорости, до которой следует разгонять электропривод в системе позиционирования, определяется величиной заданного перемещения, шагом интегрирования и ограничениями на рывок и ускорение [4].

Путь разгона при выходе электропривода на установившуюся скорость не должен превышать половины заданного перемещения. Выбор

максимальной скорости позиционного электропривода следует осуществлять в функции заданного перемещения  $L_3$  таким образом, чтобы с учетом дискретности управления путь торможения был не менее пути разгона.

#### Управления позиционным электроприводом

На основе метода последовательного многошагового синтеза разработан алгоритм расчета закона управления на участке разгона позиционного электропривода с учетом принятых ограничений. Он предусматривает расчет пробных шагов с последующим переводом системы в установившееся состояние. Анализ координат системы позволяет выбрать управление комплексным электроприводом для очередного шага. Начальные значения скорости ( $L_{\omega(i-1)}$ ), ускорения ( $\Delta L_{\omega(i-1)}$ ), пути разгона ( $L_{p(i-1)}$ ) и торможения ( $L_{T(i-1)}$ ), прогнозируемого установившегося значения скорости ( $L'_{\omega(i-1)}$ ) и отработанного электроприводом перемещения  $L_{n(i-1)}$  принимаются равными нулю. Вычисляется величина  $\Delta L_{\omega f}$ , соответствующая требуемому приращению скорости на очередном шаге для достижения электроприводом максимальной скорости за один шаг, и сравнивается со значением  $\Delta L_{\omega \text{ок}}$ . В алгоритме предусмотрена потенциальная возможность разгона позиционного электропривода до скорости  $L_{\omega \text{м}}$ , так как заданные перемещения могут быть значительными. Ускорение на предыдущем такте управления принимается равным  $\Delta L_{\omega(i-1)}$ , если  $\Delta L_{\omega f}$  больше предельного значения рывка. В противном случае это ускорение принимается равным  $\Delta L_{\omega f}$ . Затем анализируется необходимость выполнения очередного шага с предельными динамическими возможностями электропривода. Для этого оценивается целесообразность выполнения очередного шага с прежним ускорением  $\Delta L_{\omega(i-1)}$ . Если оно равно нулю, то выполнять пробный шаг с таким ускорением нет смысла. Следует сразу проводить расчеты для пробного шага с ускорением  $\Delta L_{\omega \text{ок}}$ , которое больше значения ускорения с предыдущего шага на величину допустимого рывка  $\Delta L_{\omega \text{ок}}$ . В противном случае оно принимается равным ускорению электропривода на предыдущем шаге. Рассчитываются прогнозируемая установившаяся скорость электропривода  $L'_\omega$  после выполнения пробного шага с выбранным ускорением и путь разгона  $L_p$  до нее

$$L'_\omega = L'_{\omega(i-1)} + \Delta L_{\omega \text{ок}}, \quad (1)$$

$$L_p = L_{p(i-1)} + 2L'_\omega - L_{\omega(i-1)}. \quad (2)$$

Отсутствие нарушений ограничений позволяет выполнить шаг, аналогичный пробному шагу, реально, поэтому прогнозируемая установившаяся скорость электропривода, путь разгона до нее и путь торможения  $L_{T(i)}$  принимают новые значения

$$L'_{\omega(i)} = L'_\omega,$$

$$L_{p(i)} = L_p,$$

$$L_{T(i)} = L_{p(i)} + L'_{\omega(i)}.$$

Нарушение ограничений запрещает выполнение шага, аналогичного пробному шагу, с принятым ускорением  $\Delta L_{\omega \text{ок}}$ , поэтому  $L'_{\omega(i)}$ ,  $L_{p(i)}$  и  $L_{T(i)}$  остаются без изменений. Ускорение  $\Delta L_{\omega(i)}$  и скорость  $L_{\omega(i)}$  электропривода на очередном шаге, а также суммарный пройденный путь  $L_{n(i)}$  вычисляются по выражениям

$$\Delta L_{\omega(i)} = \Delta L_{\omega \text{ок}} - \Delta L_{\omega \text{ок}}, \quad (3)$$

$$L_{\omega(i)} = L_{\omega(i-1)} + \Delta L_{\omega(i)}, \quad (4)$$

$$L_{n(i)} = L_{n(i-1)} + \Delta L_{\omega(i)}.$$

В случае возможности выполнения электроприводом рассчитанного пробного шага с ускорением  $\Delta L_{\omega \text{ок}}$  оценивается необходимость расчета с большим ускорением еще одного пробного шага. Такой шаг рассчитывается, если значение  $\Delta L_{\omega \text{ок}}$  отличается от значения  $\Delta L_{\omega \text{м}}$  и равно ускорению  $\Delta L_{\omega(i-1)}$ . Новое ускорение на втором пробном шаге определяется по выражению

$$\Delta L_{\omega \text{ок}} = \Delta L_{\omega(i-1)} + \Delta L_{\omega \text{ок}}.$$

Новый пробный шаг не рассчитывается в случае отличия ускорения на предыдущем пробном шаге от ускорения электропривода или равенства его допустимому значению  $\Delta L_{\omega \text{м}}$ . Ускорение электропривода  $\Delta L_{\omega(i)}$  на очередном шаге принимается равным  $\Delta L_{\omega \text{ок}}$ . Таким образом, в приведенном алгоритме возможен расчет не более двух пробных шагов. Учитываются ограничения на рывок, ускорение и скорость, осуществляется поиск оптимального управления и разгон электропривода до установившегося значения скорости в функции заданного перемещения. Напряжение управления  $U_{y(i)}$  комплексным электроприводом с коэффициентом передачи  $K_{\text{эл}}$  формируется с учетом принятого шага

$$U_{y(i)} = L_{\omega(i)} / \Delta t / K_{\text{эл}}.$$

Алгоритм обеспечивает выбор оптимального значения максимальной скорости движения позиционного электропривода и разгон до нее без перерегулирования с прохождением не более половины заданного перемещения при релейном изменении значения рывка на участках увеличения и уменьшения ускорения. Движение электропривода с предельным ускорением меньше максимального значения возможно на нескольких тактах управления, что устраняет длительный режим при выходе на заданную скорость, значение которой может быть равно  $L_{\omega \text{м}}$  или меньшему значению, кратному максимальному рывку.

Стремление обеспечить минимум времени отработки задания позиционным электроприводом предполагает максимально возможное время движения на максимальной скорости. При дискретном управлении, когда информация с датчика обратной связи поступает в регулятор положения с запаздыванием на один такт, путь торможения  $L_{T(i)}$  не может быть меньше пути разгона  $L_{p(i)}$ . Движение на установившейся скорости осуществляется до тех пор, пока остаток  $\Delta L_{\omega \text{ок}}$  перемещения ( $L_3 - L_{n(i)}$ ) не станет меньше пути торможения  $L_{T(i)}$ .

На заключительном участке необходимо изменить темп торможения в функции ошибки позиционирования  $\Delta L_{осм}$  и текущего значения скорости  $L_{\omega}$  электропривода по нелинейной зависимости таким образом, чтобы обеспечить выход в заданную позицию с малым ускорением на малой скорости. При этом на каждом шаге расчет ускорения торможения ведется в предположении равнозамедленного движения с текущего значения скорости до останова, принимая остаток перемещения меньше истинного значения на величину  $K2L_{\omega}$ , пропорциональную постоянному коэффициенту  $K2$ . Задается убывающий запас в пути торможения. Ускорение торможения при этом изменяется по нелинейной зависимости и определяется выражением

$$\Delta L = \frac{L_{\omega}^2}{2(\Delta L_{осм} - K2L_{\omega})}$$

С уменьшением скорости электропривода составляющая запаса  $K2L_{\omega}$  в пути торможения убывает, поэтому снижается и ускорение электропривода при подходе к заданной позиции, и гарантируется останов без перегулирования по положению. При дискретном управлении, когда  $\Delta L_{осм} < K2L_{\omega}$ , темп торможения следует определять без учета запаса в пути торможения, принимая  $K2=0$ . Заканчивать торможение следует на скорости, которая определяется, исходя из требуемой точности позиционирования. Изменение в широких пределах ограничений и заданий не нарушают работоспособности алгоритма.

**Управление позиционным электроприводом при начальном движении на установившейся скорости и новом задании перемещения**

В случае получения нового задания на перемещение при движении электропривода на начальной установившейся скорости  $L_{\omega,нач}$  формирование оптимального закона управления следует выполнять с учетом ограничений и величины оставшегося перемещения. При этом возможно движение электропривода на очередном шаге после получения нового задания, как на прежней скорости, так и разгон или торможение.

При синтезе управлений позиционной системой численным методом закон формируется во время переходного процесса и составляется из оптимальных управлений для малых шагов. В алгоритме на начальном этапе вычисляется разность  $\Delta L_{осм}$  между заданным  $L_3$  и реально пройденным  $L_n$  перемещениями, которая сравнивается с точностью позиционирования. Если обеспечена требуемая точность позиционирования, то электропривод останавливается ( $U_{н(0)}=0$ ). В противном случае производится сравнение  $\Delta L_{осм}$  и ранее определенного пути торможения  $L_T$  электропривода с установившейся скорости.

Если  $\Delta L_{осм}$  меньше пути торможения  $L_T$ , то начинается торможение. Если  $\Delta L_{осм}$  больше или равен  $L_T$ , то рассчитывается пробный шаг разгона элек-

тропривода до максимальной скорости  $L_{\omega,м}$ . Вычисляется величина  $\Delta L_{\omega,р}$ , соответствующая требуемому приращению скорости на очередном шаге для достижения максимальной скорости за шаг с учетом начальной установившейся скорости электропривода  $L_{\omega,нач}$ . Затем, как и в предыдущем алгоритме позиционирования, по выражениям (1)–(2) определяются значения скорости  $L_{\omega}'$  после выполнения пробного шага с выбранным ускорением и путь разгона  $L_p$  до нее.

Определяется число шагов управления  $N_1$ , необходимых для уменьшения ускорения до нуля. Если отношение ускорений  $\Delta L_{\omega,к}/\Delta L_{\omega,дн} \leq 1$ , то  $N_1=2$ . Если отношение ускорений  $\Delta L_{\omega,к}/\Delta L_{\omega,дн} > 1$ , то  $N_1=\Delta L_{\omega,к}/\Delta L_{\omega,дн}+1$ . Предварительно определено число шагов управления  $N_2$ , которые пройдет электропривод на начальной установившейся скорости  $L_{\omega,нач}$  при прогнозировании разгона. Для первого пробного шага  $N_2=0$ . Вычисляется прогнозируемое перемещение  $L_p'$  электропривода в результате осуществления с предельными возможностями пробного шага при разгоне и дальнейшего уменьшения ускорения до нуля

$$L_p' = L_p + L_{\omega,нач} (N_1 + N_2 + 1)$$

Определяется наличие шагов  $K$  движения электропривода с предельным ускорением на участке торможения. Если  $(L_{\omega}' + L_{\omega,нач}) \leq (\Delta L_{\omega,м}/\Delta L_{\omega,дн})^2$ , то движения с предельным ускорением на участке торможения нет, и количество шагов нарастания ускорения  $N_f$  с предельным рывком при торможении электропривода определяется по выражению

$$N_f = \sqrt{(L_{\omega,нач} + L_{\omega}') / \Delta L_{\omega,дн}}$$

При этом путь торможения электропривода до останова определяется по выражению

$$L_T = (L_{\omega,нач} + L_{\omega}') (N_f + 1) + (L_{\omega,нач} + L_{\omega}')$$

Если  $(L_{\omega}' + L_{\omega,нач}) > (\Delta L_{\omega,м}/\Delta L_{\omega,дн})^2$ , то присутствуют шаги движения с предельным ускорением на участке торможения, и количество шагов нарастания ускорения  $N_f$  с предельным рывком при торможении электропривода определяется по выражению

$$N_f = \Delta L_{\omega,м} / \Delta L_{\omega,дн}$$

Количество шагов движения электропривода с предельным ускорением на участке торможения определяется по выражению

$$K = (L_{\omega,нач} + L_{\omega}') / (N_f \Delta L_{\omega,дн}) - N_f$$

При этом путь торможения электропривода до останова определяется по выражению

$$L_T = (L_{\omega,нач} + L_{\omega}') (2 N_f + K + 2) / 2 + (L_{\omega,нач} + L_{\omega}')$$

Затем осуществляется анализ возможности реализации такого пробного шага. Если не выполняются условия  $L_{\omega}' > (L_{\omega,м} - L_{\omega,нач})$  или  $(L_p' + L_T) > L_3$ , то шаг, аналогичный пробному шагу, возможен, и далее выполняются операции как в ранее описанном алгоритме позиционирования.

Если выполняется хотя бы одно условие  $L_{\omega}' > (L_{\omega m} - L_{\omega \text{нач}})$  или  $(L_p' + L_T) > L_3$ , то шаг, аналогичный пробному шагу, невозможен. Ускорение электропривода  $\Delta L_{\omega(i)}$  определяется по выражению (3).

$$N_2 = N_2 + 1. \quad (5)$$

Анализируется полученное ускорение. Если выполняется условие  $\Delta L_{\omega(i)} = 0$ , то по выражению (4) вычисляется новое значение скорости  $L_{\omega(i)}$ , которая суммируется с  $L_{\omega \text{нач}}$ . Если не выполняется условие  $\Delta L_{\omega(i)} = 0$ , то определяется по выражению (5) новое число шагов управления  $N_2$ , которые пройдет электропривод на начальной установившейся скорости  $L_{\omega \text{нач}}$  при прогнозировании разгона, и затем вычисляется по выражению (4) новая скорость  $L_{\omega(i)}$ .

Определяется скорость  $L_{\omega,1}$  электропривода на очередном шаге управления с учетом начальной скорости  $L_{\omega \text{нач}}$

$$L_{\omega,1} = L_{\omega(i)} + L_{\omega \text{нач}}.$$

Вычисляется перемещение  $L_n$  электропривода после выполнения такого шага с учетом найденной скорости  $L_{\omega,1}$

$$L_n = L_n + L_{\omega,1}.$$

После выполнения такого шага остаток перемещения определяется по выражению

$$L_{\text{ост}} = L_3 - L_n.$$

Когда остаток  $\Delta L_{\text{ост}}$  перемещения станет меньше пути торможения  $L_T$ , вступает в действие ранее описанный алгоритм формирования закона управления электроприводом на участке торможения. В качестве начальной скорости электропривода  $L_{\omega(i)}$  в начале торможения принимается ранее найденное значение скорости  $L_{\omega,1}$  отработки перемещения.

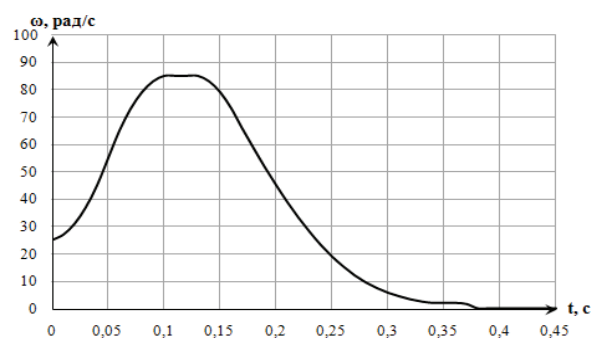


Рис. 1. График изменения скорости электропривода с ограничениями рывка и ускорения при изменении задания на перемещение

На рис. 1 приведен график изменения скорости электропривода при изменении задания на перемещение, когда при формировании закона управления вступают в действие ограничения на рывок и ускорение. Электропривод не разгоняется до предельной скорости. Испытания алгоритма при незначительных изменениях задания на перемещение на начальной скорости показали, что формирование законов управления электроприводом вы-

полняется, как и в ранее описанном алгоритме управления позиционированным электроприводом.

На рис. 2 приведен график изменения скорости электропривода при изменении задания на перемещение, когда при формировании закона управления вступают в действие ограничения на рывок, ускорение и скорость.

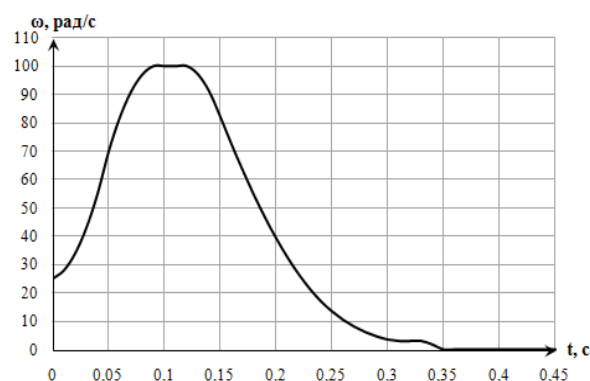


Рис. 2. График изменения скорости электропривода с ограничениями рывка, ускорения и скорости при изменении задания на перемещение

На рис. 3 приведен график изменения скорости электропривода при изменении задания на перемещение с ограничениями рывка, ускорения и скорости, когда отсутствовала начальная скорость.

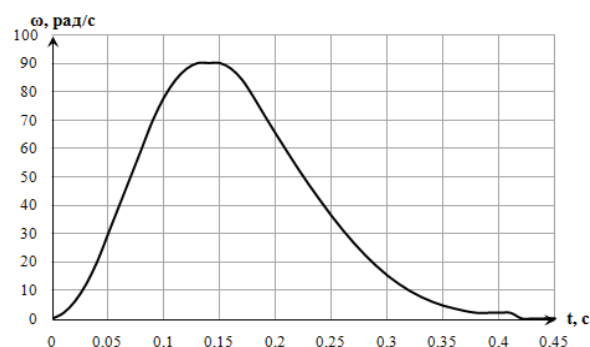


Рис. 3. График изменения скорости электропривода с ограничениями при отработке задания на перемещение с нулевой начальной скорости

Разработанный алгоритм показал высокую эффективность при изменениях в широком диапазоне ограничений на рывок, ускорение и скорость, начальных скоростей движения и заданий на перемещение. Во всех случаях отработка перемещений выполняется с предельным быстродействием и заданной точностью с учетом принятых ограничений без перерегулирования по положению.

### Выводы

1. Метод последовательного многошагового синтеза оптимальных управлений, основанный на имитационном моделировании и динамическом программировании, принципах «переметы цели» и «ведущего слабого звена» позволяет

- разрабатывать простые алгоритмы синтеза в реальном масштабе времени микропроцессорными средствами законов управления позиционными электроприводами.
2. Составлен алгоритм перемещения рабочего органа с любой установившейся скорости без перерегулирования по положению при изменении задания во время переходного процесса.
  3. Отработка заданий выполняется с требуемой точностью и предельным быстродействием при строгом выполнении ограничений на рывок, ускорение и скорость.
  4. Изменение в широком диапазоне ограничений, заданий на перемещения, точности позиционирования и начальных скоростей электропривода не нарушает работоспособности алгоритмов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковенко П.Г. Методика последовательного многошагового синтеза оптимальных управлений // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 2. – С. 95–98.
2. Беллман Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. – М.: Мир, 1974. – 207 с.
3. Мясников В.А., Игнатъев М.Б., Покровский А.М. Программное управление оборудованием. – Л.: Машиностроение, 1974. – 243 с.
4. Яковенко П.Г. Оптимизация законов управления позиционными электроприводами при управлении от ЭВМ // Системы электропривода и промышленной автоматики с управлением от микропроцессоров и ЭВМ. – Л.: ЛДНТП, Ленингр. отделение, 1983. – С. 32–35.

Поступила 22.05.2012 г.

УДК 62–83: 621.314.632

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ВЕНТИЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ В НОРМАЛЬНОМ И АВАРИЙНОМ РЕЖИМАХ

Ю.Н. Дементьев

Томский политехнический университет  
E-mail: dementiev@mail2000.ru

*Представлены аналитические выражения для определения основных величин электроприводов переменного тока с вентильным преобразователем в основном и аварийном режимах его работы. Полученные аналитические выражения позволяют относительно просто и с достаточной точностью определить временные функции основных величин, величины первой и высших гармоник, добавочные потери и исходные данные для выбора силовых элементов вентильного преобразователя для основного и аварийного режимов.*

#### Ключевые слова:

*Электрический электропривод, переменный ток, вентильный преобразователь, математическое описание.*

#### Key words:

*Electric drive, alternating current, valve converter, mathematical description.*

Успехи в развитии силовой полупроводниковой техники позволяют решать задачи создания наиболее рациональных способов коммутирования тока в цепях электрических машин постоянного и переменного тока и получить регулируемые электромашино-вентильные системы. Одним из перспективных направлений в развитии машино-вентильных систем являются регулируемые приводы, сочетающие вентильные преобразователи и машины переменного тока, что дает возможность создавать высокоэффективные системы электропривода. Системы электропривода с вентильными регулировочными устройствами имеют сложное поведение из-за многократной нелинейности системы и большого числа инерционных звеньев.

В силу нелинейности элементов, входящих в состав вентильных регулировочных устройств, анализ и расчет электромагнитных процессов и ве-

личин в таких системах сопряжен со значительными трудностями [1–3]. Однако исследование таких систем актуально, так как из-за применения вентиляей изменяются их характеристики при работе в статических и динамических режимах. На рис. 1 приведена схема трехфазного мостового симметрично управляемого вентильного преобразователя, работающего с синхронной машиной (СМ) или асинхронной (АМ).

На схеме на зажимы  $a$ ,  $b$ ,  $c$  трехфазного мостового вентильного преобразователя присоединяется, в случае привода переменного тока на базе СМ с симметричным ротором – обмотка статора, а в асинхронном электроприводе, например, надсинхронном вентильном каскаде – обмотка ротора АМ.

За положительное направление токов, напряжений и потокосцеплений принято направление от нулевой точки к зажимам  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .