

УДК: 62-231.2: 62-50:662.933.23

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СИСТЕМЕ ШИП – Д ДЛЯ ПСУ БИШКЕКСКОЙ ТЭЦ

КАДЫРОВ И.Ш., ПОЛЯНИНОВ Г.А.

КГТУ им. И. Раззакова

bgtu_kg@mail.ru

В статье на основании исследования физических процессов параллельного широтно-импульсного преобразователя определяются основные принципы построения систем управления электроприводом питателя сырого угля

In the article on the basis of studies of the physical processes in parallel PWM converter defines the basic principles of building electric converter systems of the raw coal feeder.

Введение. Питатель сырого угля (ПСУ) Бишкекской теплоэлектростанции (ТЭЦ) обеспечивает подачу угля в молотковую мельницу с помощью шнекового конвейера и от его производительности зависят тепловые режимы главного агрегата ТЭЦ – парового котла. При этом электродвигатель конвейера работает в длительном режиме, так как ПСУ относится к непрерывному транспортному средству. Тяжелые условия эксплуатации конвейера, связанные с завышенной концентрацией запыленности, загазованности и высокой температуры требуют особого подхода при выборе типа и исполнения автоматизированного электропривода[1].

Производительность котлоагрегата определяет необходимость регулирования подачи сырого угля в зависимости от тепло и энергопотребления, особенно в зимнее время. Номинальный режим работы конвейера обеспечивается при однородном угле без крупных посторонних примесей. В тоже время в работе электродвигателя могут возникать режимы стопорения от чрезмерной нагрузки. Ограничение тока в этих режимах является одним из главных требований, предъявляемых к электроприводу.

Рассматриваемый электропривод конвейера ПСУ приводится в движение от двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. Скорость двигателя регулируется параметрическим способом формированием реостатных характеристик, а питание двигателя ПСУ осуществляется по сети постоянного тока с выхода генератора собственных нужд ТЭЦ.

В настоящее время электропривод конвейера ПСУ с параметрическим способом регулирования скорости, установленный ещё в 60-е годы прошлого столетия морально и физически устарел и требует модернизации с использованием современной элементной базы как в системе управления, так и в силовой части электропривода.

Рассмотренный в [2] электропривод с транзисторным широтно-импульсным преобразователем (ШИП) не может обеспечить надежную работу, так как выпускаемые промышленностью силовые высоковольтные транзисторы являются дорогостоящими. Кроме того ограниченные предельные значения токов транзистора могут не обеспечить безопасный пуск конвейера в крайне тяжелых режимах. В связи с этим имеет смысл рассмотреть возможность построения тиристорных ШИП применительно к электродвигателю ПСУ для Бишкекской ТЭЦ.

Цели и методы. На рис.1. приведена схема тиристорно-конденсаторного преобразователя постоянного тока, в котором для регулирования напряжения двигателя используется высокочастотный ШИП с последовательной конденсаторной коммутацией [3]. Импульсный преобразователь на рис.1 отличается простотой и надежностью и может эксплуатироваться в электроприводе ПСУ, если обеспечить надежные условия коммутации силовых вентилей. Нормальные условия работы ШИП на рис.1 может быть обеспечен, при условии правильного выбора емкости коммутирующего конденсатора и пределов изменения частоты коммутации, так как напряжение питания двигателя регулируется в широких пределах при частотно-импульсном способе коммутации.

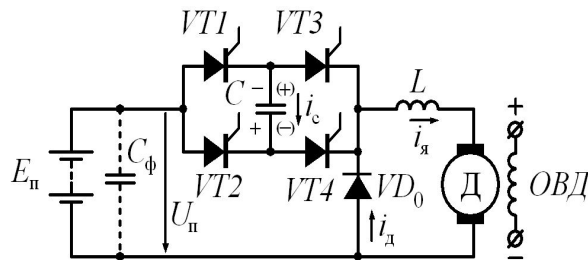


Рис. 1. Импульсный преобразователь с последовательной коммутацией.

В связи с этим основное содержание статьи направлено на получение расчетных зависимостей, с помощью которых ещё на стадии проектирования и наладки можно было бы выбрать силовые элементы в цепи коммутации с большей вероятностью обеспечивающей бесперебойную работу электропривода во всех режимах, в том числе в режиме стопорения при чрезмерном увеличении нагрузки.

Рассмотрим кратко такты работы силовых элементов импульсного преобразователя за один период коммутации:

- а) бесперебойный режим работы ШИП без срыва коммутации силовых элементов обеспечивается предварительным зарядом конденсатора C до напряжения $U_c = -U_n$, отпиранием коммутирующих тиристоров $VT2, VT3$;

б) подача импульсов на управляющие электроды открывают основные тиристоры $VT1, VT4$ и напряжение скачком прикладывается к якорной цепи. По цепи нагрузки и конденсатора C протечет ток $i_я$, который перезарядит конденсатор C до напряжения $U_c = +U_п$;

в) спадание тока, вызванный действием ЭДС самоиндукции в цепи конденсатора C откроет обратный диод $VD0$ и он обеспечит протекание тока через якорь $i_д$ обеспечивая закрытие, находящихся в работе коммутирующих тиристоров $VT1$ и $VT4$;

а) отпирание коммутирующих тиристоров $VT2, VT3$ возможен после надежного закрытия основных тиристоров $VT1$ и $VT4$ за счет спадания тока заряда конденсатора C до нуля по цепи обратного диода $VD0$, когда перезаряд конденсатора завершается достижением напряжения до первоначального уровня $U_c = -U_п$.

Отпирание и запираание силовых тиристоров и коммутирующего диода $VD0$ по тактам сопровождается переходными процессами, когда во времени изменяются ток якорной цепи $i_я = f(t)$, напряжение на конденсаторе $u_c = f(t)$, напряжение на якоре $u_я = f(t)$ и др. Параметры силовых элементов ШИП и структура системы управления могут быть определены из

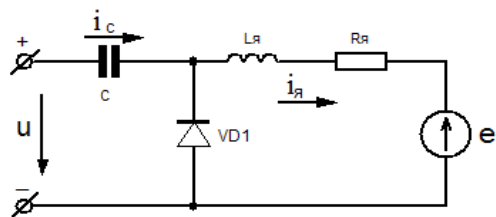


Рис. 2. Схема замещения ШИП с последовательной коммутацией

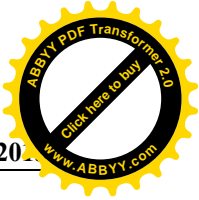
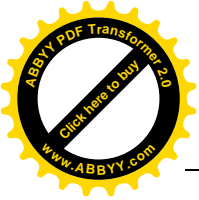
уравнений переходного процесса основных переменных ШИП при коммутации силовых вентилях.

Для исследования переходных процессов $i_c = f(t)$, $i_я = f(t)$, $u_c = f(t)$ и $u_я = f(t)$ следует составить упрощенную схему замещения, представленную на рис. 2, в которой приняты следующие обозначения: $R_{я\Sigma}$, $L_{я\Sigma}$ – суммарные значения активного сопротивления и индуктивности якорной цепи, e – ЭДС вращения двигателя.

Для схемы на рис.2 описание переходных процессов силовой части ШИП линейными дифференциальными уравнениями справедливо при введении следующих допущений:

- поток двигателя неизменный, т.е. $\Phi = const$;
- внутреннее сопротивление коммутирующих тиристоров: $r_t = \infty$ при закрытом состоянии, $r_t = 0$ – при открытом;
- силовые тиристоры и коммутирующий диод открываются и закрываются мгновенно.

Под определением бесперебойный режим работы ШИП понимается необходимость обеспечения надежного закрытия одной пары коммутирующих тиристоров перед включением другой пары, в моменты, когда процесс заряда конденсатора завершается, т.е. $i_c = 0$. В этом



случае последующий перезаряд конденсатора, в момент коммутации основных тиристорных пар, начнется с напряжения:

$$u_c = -(u - e), \quad 1)$$

и к якору двигателя приложится напряжение равное:

$$u_{\text{я}} = 2u - e \quad 2)$$

Из (2) видно, что максимальное значение напряжения, приложенное к якорной цепи, вызывающее протекание максимального тока по цепи конденсатора и якоря двигателя установится в режиме короткого замыкания двигателя, т.е. при $e = 0$.

Исследование переходных процессов целесообразно начать при низких частотах переключения коммутирующих тиристорных пар, когда каждый такт коммутации сопровождается уменьшением до нуля тока якоря через диод VD1 (рис.2). Такие условия работы силовых вентилях возможны при соблюдении неравенства:

$$f_k \leq \frac{1}{(3-4)T_{\text{я}}}, \quad 3)$$

где $T_{\text{я}} = L_{\text{я}\Sigma} / R_{\text{я}\Sigma}$ – постоянная времени якорной цепи.

Аналогичные режимы характерны и для первых циклов коммутации на рабочих частотах, при нарастании тока якоря от нуля до установившегося значения.

Процесс заряда конденсатора описывается следующим выражением:

$$u = u_c + L_{\text{я}\Sigma} di_c / dt + i_c R_{\text{я}\Sigma}. \quad 4)$$

Корни характеристического уравнения для выражения (4) определяются:

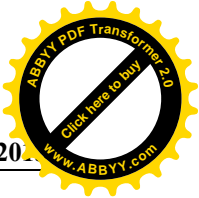
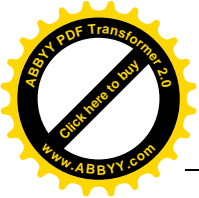
$$p_{1,2} = -\frac{R_{\text{я}\Sigma}}{2L_{\text{я}\Sigma}} \pm \frac{1}{\sqrt{CL_{\text{я}\Sigma}}} \sqrt{\frac{T_c}{4T_{\text{я}}} - 1}, \quad 5)$$

где $T_c = CR_{\text{я}\Sigma}$ – постоянная времени заряда конденсатора.

Постоянная времени $T_{\text{я}}$ двигателей средней мощности лежат в пределах $(0,1 \div 1)$ секунды из-за небольших величин сопротивления якорной цепи, следовательно, можно принять:

$$T_c / 4T_{\text{я}} \approx 0, \quad 6)$$

При этом допущении корни характеристического уравнения являются комплексно сопряженными. Решением дифференциального уравнения (5), при введении начальных условий ($U_c|_0 = -U$; $I_c|_0 = 0$), является:



$$u_c = u \left[1 - 2ue^{-\frac{t}{2T_{я}}} \left(\cos \Omega t + \frac{1}{2T_{я}\Omega} \sin \Omega t \right) \right] \tag{7}$$

где $\Omega = 1/\sqrt{CL_{я\Sigma}}$ – частота свободных колебаний перезаряда конденсатора.

Реальные значения параметров двигателей, которые могут быть использованы в электроприводах ПСУ, позволяют ввести допущение вида:

$$1/2T_{я}\Omega \ll 1. \tag{8}$$

Допущение (8) упрощает (7), поэтому окончательные выражения описывающие процессы перезаряда конденсатора имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} u_c &= u \left(1 - 2e^{-\frac{t}{2T_{я}}} \cos \Omega t \right); \\ i_c &= 2C\Omega u 2e^{-\frac{t}{2T_{я}}} \sin \Omega t. \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

Из выражений (9) можно определить время завершения перезаряда конденсатора, равное:

$$t_{\kappa} = \pi/2\Omega, \tag{10}$$

откуда максимальная частота коммутации тиристоров определится как:

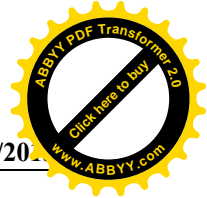
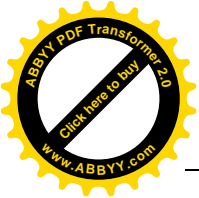
$$f_{\max} = 2\Omega/\pi = 2/\pi \sqrt{CL_{я\Sigma}}. \tag{11}$$

При увеличении частоты коммутации ток якоря становится непрерывным и тогда выражение, описывающее напряжение на конденсаторе $u_c = f(t)$ приобретает вид:

$$u_c = u + e^{-\frac{t}{2T_{я}}} \left[\frac{i_{нач}}{C\Omega} \sin \Omega t - 2u \left(1 + \frac{1}{2T_{я}\Omega} \right) \cos \Omega t \right] \tag{12}$$

$$u_c = u + e^{-\frac{t}{2T_{я}}} \left[\frac{i_{нач}}{C\Omega} \sin \Omega t - 2u \left(1 + \frac{1}{2T_{я}\Omega} \right) \cos \Omega t \right] \tag{12}$$

или с учетом ранее принятых допущений (6), (8) получим



$$\left. \begin{aligned} u_c &\cong u + \frac{i_{\text{нач}}}{C\Omega} \sin \Omega t - 2u \cos \Omega t; \\ i_c &\cong i_{\text{нач}} \cos \Omega t + 2u C \Omega \sin \Omega t. \end{aligned} \right\}$$

Как было сказано выше, закрытие пары тиристорov находящихся в работе сопровождается открытием коммутирующего диода $VD1$, в результате чего образуется электрическая цепь, в которой ток якоря протекает под действием ЭДС самоиндукции. Уравнения, описывающие переходный процесс изменения тока якоря $i_{\text{я}} = f(t)$ в этом такте имеет вид:

$$\begin{aligned} L_{\text{я}\Sigma} di_c / dt + i_c R_{\text{я}\Sigma} &< 0; \\ -L_{\text{я}\Sigma} \Omega i_{\text{нач}} \sin \Omega t + 2u \cos \Omega t + i_{\text{нач}} R_{\text{я}\Sigma} & \end{aligned} \quad (14)$$

Сделав допущение, что частота коммутации тиристорov намного больше частоты свободных колебаний контура, имеем:

$$\left. \begin{aligned} \sin \Omega t &\cong \sin \Omega / f_{k \max} \approx \Omega / f_{k \max}; \\ \cos \Omega t &\cong \cos \Omega / f_{k \max} \approx 1. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

При условиях (15) ток якоря, а следовательно и начальный ток заряда конденсатора стремится к току короткого замыкания:

$$i_{\text{нач}} = I_{\text{кз}} = U / R_{\text{я}\Sigma} \quad (16)$$

Подставляя (16) во второе уравнение (14) с учетом (15) получим равенство:

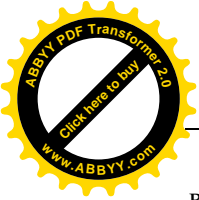
$$\Omega \cdot \Omega \cdot \frac{L_{\text{я}\Sigma}}{R_{\text{я}\Sigma}} \cdot \frac{1}{f_{k \max}} \cong 3,$$

откуда максимальная частота коммутации силовых элементов ШИП:

$$f_{k \max} = \frac{1}{3R_{\text{я}\Sigma}C}, \quad (17)$$

а среднее значение максимального тока якоря примерно равно:

$$I_{\text{max}} \cong 2/3 I_{\text{кз}}.$$



Результаты исследований. Принятые допущения справедливы для малых значений величины коммутирующей емкости. При ее увеличении и возрастании времени заряда, на характер переходных процессов начинает сказываться как экспоненциальная составляющая, так и фазовый сдвиг, определяемые уравнением (12). Это приводит к увеличению запаса устойчивости при коммутации, и как следствие, к некоторому повышению частоты коммутации и максимального значения тока якоря.

В то же время при малых значениях величины коммутирующей емкости в полной мере начинает сказываться неидеальность параметров самих элементов силовой схемы и в первую очередь – емкость коммутирующего диода. Как показали экспериментальные исследования, при использовании элементов силовой схемы общепромышленного применения, исключения влияния их параметров на работу системы обеспечивается при величине коммутирующей емкости 5-10 мкФ. Оптимальное значение емкости, исходя из условий обеспечения надежности работы схемы и массогабаритных показателей, лежат в пределах 20-100 мкФ.

Для электродвигателей средней мощности допустимое значение стопорного тока гораздо меньше тока короткого замыкания двигателя. При этом ограничении максимального тока может быть достигнуто ограничением максимальной частоты коммутации без использования других способов автоматического токоограничения.

Задавшись величиной коммутирующей емкости и значением стопорного тока ($I_{\text{стоп}} = 2I_{\text{яном}}$) можно определить максимальную частоту коммутации задаваемой системой регулирования тиристорами из выражения:

$$2U \cong CI_{\text{max}}t = \frac{CI_{\text{max}}}{f_{\text{kmax}}},$$

откуда

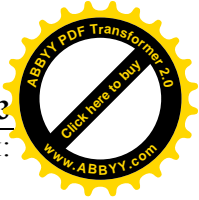
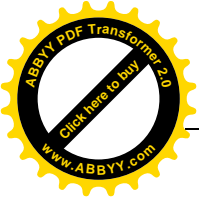
$$f_{\text{kmax}} = \frac{CI_{\text{яном}}}{U}.$$

Вывод:

Выполненный анализ работы преобразователя с последовательной коммутацией позволяет обоснованно выполнить выбор параметров элементов силовой схемы и системы управления при надежном ограничении максимального значения тока якоря заданным значением.

Литература

1. Кадьров И.Ш. Разработка электропривода питателя сырого угля Бишкекской ТЭЦ с микропроцессорным вычислением регулируемых параметров в замкнутой системе управления. В сб. 4 Международной научно-технической конференции «Энергетика,



телекоммуникации и высшее образование в современных условиях». АИЭС, 2004. – Алматы: - С. 229-236.

2. Кадыров И.Ш., Полянинов Г.А., Борукеев Т.С. Проблемы и пути решения автоматического управления электроприводом питателя сырого угля ТЭЦ г. Бишкек. Известия КГТУ им. Раззакова, Бишкек: № 25, 2011. — С. 187-195.

Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.