

## ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМАМИ С МНОГОФАЗНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В. А. БЕЙНАРОВИЧ, А. И. САПОЖНИКОВ

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ при ТПИ)

При питании от общего источника постоянного тока ограниченной мощности нескольких идентичных нагрузок, регулируемых способом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) по одинаковому для всех нагрузок закону, возникает вопрос о выборе рациональной схемы силовой части импульсного модулятора и определения оптимального закона управления, обеспечивающего минимум потерь энергии. Такая задача, например, возникает при разработке импульсной системы без реостатного управления двухдвигательным тяговым приводом рудничных аккумуляторных электровозов.

В настоящее время в построении указанных систем имеются две тенденции:

1) использование однофазных силовых ШИМ, в которых имеется один силовой ключ, питающий одновременно все нагрузки, включенные параллельно;

2) использование многофазных ШИМ, в которых имеется несколько силовых ключей, каждый из которых питает одну нагрузку, причем цепочки из силового ключа и нагрузки подключаются параллельно источнику, обычно имеют одинаковые параметры и коммутируются поочередно со сдвигом во времени.

Проведем сравнительный анализ потерь в аккумуляторном источнике питания в схеме с несколькими идентичными нагрузками, питающимися через индивидуальные силовые ключи с целью выяснения оптимального закона управления, обеспечивающего минимум потерь в аккумуляторе при следующих допущениях:

1) нагрузки представляются идентичными активно-индуктивными цепями с постоянными параметрами  $R$ ,  $L$  и постоянной противоэдс  $E$ ;

2) силовые ключи и шунтирующие диоды обладают идеальными свойствами — переключение происходит мгновенно, сопротивление в включенном состоянии равно нулю, в выключенном — бесконечности;

3) аккумуляторная батарея представляется источником постоянной эдс  $E_u$  и с неизменным внутренним сопротивлением  $R_u$ ;

4) ток, потребляемый от источника каждой нагрузкой, имеет прямоугольную форму;

5) потерями от токов, связанных с процессами искусственной коммутации, пренебрегаем.

С учетом сказанного, схема замещения системы имеет вид, показанный на рис. 1.

При многофазной широтно-импульсной модуляции с периодом  $T$ ,

каждый из силовых ключей может включаться со сдвигом во времени на часть периода  $\lambda T$ , причем относительный сдвиг момента включения одного ключа относительно другого  $\lambda$  может иметь значения от 0 до 1. Длительность импульса  $\gamma T$  определяется коэффициентом заполнения импульса  $\gamma$ , который в процессе регулирования также изменяется от 0 до 1.

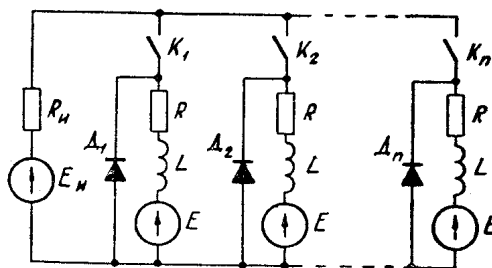


Рис. 1.

При отсутствии фазового сдвига  $\lambda=0$  (или  $\lambda=1$ ), при  $\gamma=1$  и любом количестве  $n$  получается режим однофазной ШИМ, когда все силовые ключи работают синхронно. В этом случае потребляемый от источника ток имеет прерывистый характер и на интервале импульса равен сумме токов всех нагрузок. Мощность потерь энергии в источнике питания в этом случае при любом значении  $n$  будет иметь максимальную величину

$$\text{где} \quad \Delta P_0 = (nI)^2 R_u \gamma, \quad (1)$$

$n$  — число нагрузок;  
 $I$  — ток одной нагрузки.

При наличии фазового сдвига  $\lambda \neq 0$ , при  $\gamma \neq 1$  и числе нагрузок  $n > 1$  получается режим многофазной ШИМ, когда силовые ключи работают со сдвигом по фазе в определенной последовательности. В зависимости от соотношений величин  $\lambda$ ,  $\gamma$  и количества нагрузок (или силовых ключей)  $n$  возможно получение различных режимов потребления тока от источника питания на интервале периода коммутации: прерывистого тока с постоянной или ступенчато изменяющейся амплитудой импульса, непрерывного тока со ступенчатым характером изменения величины во времени или постоянного тока.

Рассмотрим наиболее часто встречающийся на практике случай питания двух нагрузок  $n=2$  (например, двухдвигательные приводы). При наличии фазового сдвига  $0 < \lambda < 1$  и изменения  $0 \leq \gamma \leq 1$  в таких системах получается двухфазная ШИМ и возможны следующие режимы потребления тока от источника.

Режим прерывистого тока с постоянной амплитудой на интервалах импульсов, равной току одной нагрузки, возникает при условии отсутствия одновременного питания двух нагрузок

$$\begin{cases} \gamma \leq \lambda \\ \gamma \leq 1 - \lambda. \end{cases} \quad (2)$$

Граница этого режима соответствует касанию импульсов токов двух нагрузок и определяется условием

$$\begin{cases} \gamma = \lambda_1 \\ \gamma = \lambda_2. \end{cases} \quad (3)$$

Мощность потерь в источнике питания в режиме прерывистого тока с постоянной амплитудой импульсов определится следующим выражением:

$$\Delta P_2 = 2I^2 R_u \gamma. \quad (4)$$

Режим непрерывного тока возникает в случае наложения и непрерывного касания потребляемых от источника импульсов тока (рис. 2), что соответствует условию

$$\begin{cases} \gamma \geq \lambda \\ \gamma \geq 1 - \lambda. \end{cases} \quad (5)$$

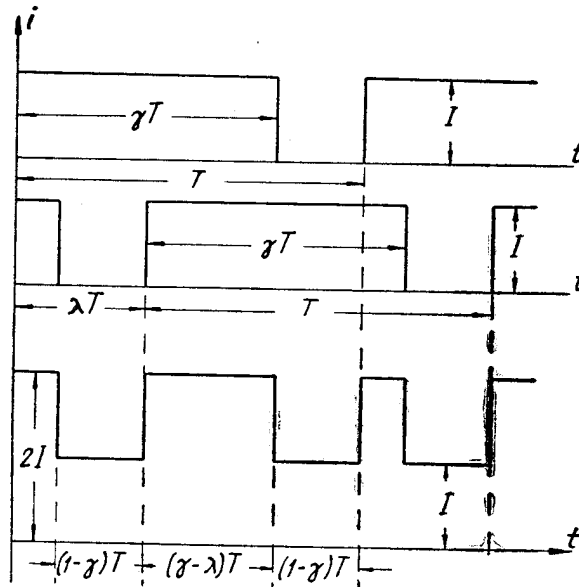


Рис. 2.

Граница этого режима также определяется выражением (3), поскольку оно учитывает условие касания импульсов тока, т. е. условие перехода тока от прерывистого к непрерывному.

Мощность потерь в источнике питания в режиме непрерывного тока определяется выражением

$$\Delta P_2 = 2I^2 R_u (3\gamma - 1). \quad (6)$$

При всех других соотношениях величин  $\gamma$  и  $\lambda$ , не удовлетворяющих условиям (2) и (5), потребляемый от источника ток будет иметь прерывистый характер со ступенчатым изменением величины тока на интервалах импульсов.

Мощность потерь в источнике питания в режиме прерывистого тока со ступенчато изменяющейся формой импульса определяется в зависимости от соотношений и следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & \lambda \leq \gamma \leq 1 - \lambda \\ & \Delta P_3 = 2I^2 R_u (2\gamma - \lambda) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & \lambda \geq \gamma \geq 1 - \lambda \\ & \Delta P_4 = 2I^2 R_u (2\gamma + \lambda - 1). \end{aligned} \quad (8)$$

Для удобства и наглядности определения режима потребления тока от источника питания в зависимости от значений  $\gamma$  и  $\lambda$  в системе с двумя нагрузками на рис. 3 представлена диаграмма режимов, полученная из граничных условий (2) и (5). Границы режимов представляются в плоскости параметров  $\gamma$  и  $\lambda$  двумя прямыми, пересекающимися в точке  $\gamma=0,5$   $\lambda=0,5$ . Вся плоскость возможных значений параметров  $\gamma$  и  $\lambda$  разделяется на четыре области, соответствующие следующим режимам потребления тока от источника:

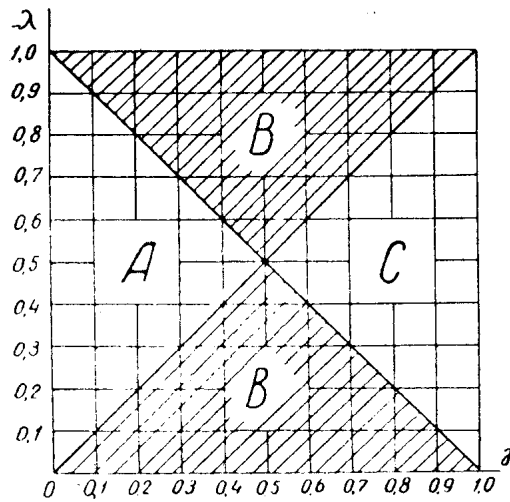


Рис. 3

- область *A* — режим прерывистого тока с постоянной амплитудой импульсов;
- область *B* — режим прерывистого тока со ступенчато изменяющейся формой импульсов;
- C* — режим непрерывного тока со ступенчатым изменением его величины.

Полученные выражения позволяют определять количественно зависимость мощности потерь в источнике от величины фазового сдвига  $\lambda$  при различных значениях  $\gamma$ . На рис. 4 представлена диаграмма зависимости отношения мощности потерь двухфазной к однофазной ШИМ от величины  $\lambda$  для различных постоянных значений  $\gamma$ , из которой видно, что оптимальная величина фазового сдвига для двух нагрузок равна 0,5.

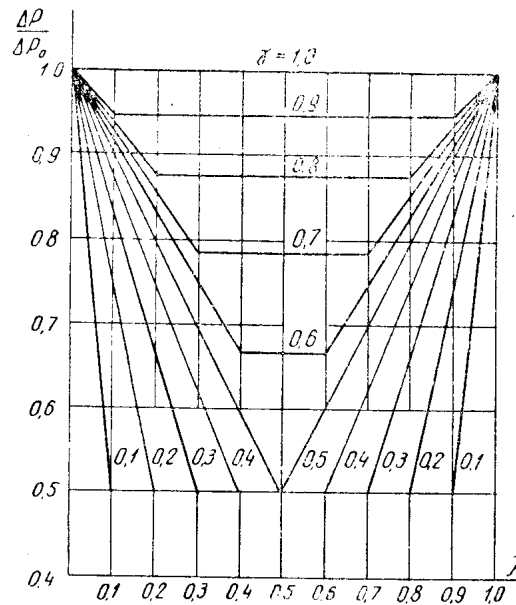


Рис. 4

Проведя аналогичный анализ для импульсных систем с числом нагрузок больше двух, можно определить оптимальные значения фазового

сдвига для каждого конкретного числа нагрузок  $n$  и выражения мощности потерь. Далее, из полученных частных выражений по методу индукции можно получить общие условия для минимума потерь в источнике питания. Величина мощности потерь при любых постоянных значениях  $\gamma$  и  $n$  постепенно уменьшается при увеличении  $\lambda$  от 0 до  $\frac{1}{n}$ , достигает минимума при  $\lambda = \frac{1}{n}$  и снова увеличивается при дальнейшем возрастании  $\lambda$  от  $\frac{1}{n}$  до 1. В результате оказывается, что оптимальный фазовый сдвиг, обеспечивающий минимум потерь в источнике, равен величине, обратной числу нагрузок,

$$\lambda_{\text{опт}} = \frac{1}{n}; \quad (9)$$

а мощность потерь при этом имеет минимальное значение

$$\Delta P_{\text{опт}} = I^2 R_{\text{и}} [n\gamma (1 + 2k) - k(k + 1)], \quad (10)$$

где  $k$  — целая часть отношения  $\gamma$  к  $\lambda$ , равная  $0, 1, 2, \dots, (n-1)$ .

При увеличении числа нагрузок мощность потерь уменьшается. Теоретически достижимое минимальное значение мощности потерь в источнике при выполнении условия оптимального уравнения (9) и  $n \rightarrow \infty$  определяется выражением

$$\Delta P_{\text{опт}} = I^2 R_{\text{и}} (n\gamma)^2. \quad (11)$$

На рис. 5 представлены зависимости мощности потерь в относительных единицах от величины  $\gamma$  и числа нагрузок  $n$ . Кривая минимально достижимой мощности потерь при  $n \rightarrow \infty$  показана пунктиром.

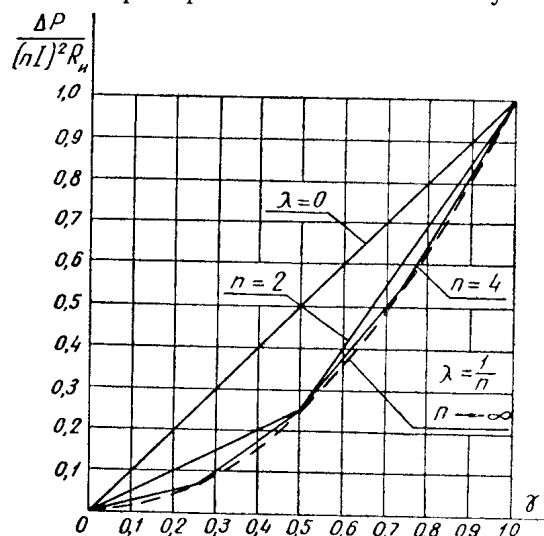


Рис. 5.

Из рассмотрения рис. 5 следует, что наиболее целесообразными можно считать системы с широтно-импульсной модуляцией, содержащие два — четыре ключа. Дальнейшее увеличение фазности ШИМ вызовет значительное усложнение системы, но не принесет ощутимой экономии энергии за счет уменьшения потерь в источнике питания.