

### ПРОВЕРКА ДВИГАТЕЛЯ ПО НАГРЕВУ В ИОННОМ ПРИВОДЕ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ С ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

Ю. М. АЧКАСОВ, В. А. БЕЙНАРОВИЧ, А. И. ЗАЙЦЕВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Импульсное регулирование скорости двигателей основано на том, что к якорию двигателя подводится энергия в виде отдельных импульсов, скорость вращения двигателя зависит от количества энергии в импульсе и частоты повторения импульсов.

Преимущества такого способа регулирования описаны в предыдущей работе настоящего сборника и [1, 2].

Интересным, но мало изученным остается вопрос нагрева двигателя, работающего в системе импульсного регулирования при питании от управляемого многофазного ионного выпрямителя.

В большинстве случаев двигатели средней мощности питаются от выпрямителей с числом фаз две и больше. Двигатель может работать как в области прерывистого, так и в области непрерывного тока. Поэтому при выборе мощности двигателя и проверке его на нагрев необходимо учитывать число фаз и режим работы выпрямителя.

Рассмотрим работу двигателя в импульсном режиме при питании его от 3-фазной схемы выпрямления с нулевым проводом (рис. 1).

Примем следующие условия:

- 1) падение напряжения в дуге вентилля постоянно;
- 2) время ионизации и деионизации не учитываем;
- 3) нагрузка, замыкающая цепь, состоит из э. д. с. и неизменных по величине омического сопротивления и индуктивности.

Приняв эти условия, рабочую схему выпрямитель-двигатель можно заменить эквивалентной (рис. 2), где  $U_m$  — амплитуда переменного напряжения;  $E_d$  — падение напряжения в дуге;  $K$  — ключ, который замыкает и размыкает цепь в зависимости от управляющего сигнала в схеме автоматического регулирования скорости;  $i$  — мгновенное значение тока в цепи двигателя;  $E$  — противо э. д. с. двигателя.

Для упрощения выводов и удобства их применения выразим основные величины в относительных единицах.

Относительные значения напряжения

$$\epsilon = \frac{E + E_d}{U_m} \quad (1)$$

Относительное значение тока через вентиль

$$i = \frac{iR}{U_M} = \frac{i}{I_M}, \quad (2)$$

где  $I_M$  — базисный ток —

$$I_M = \frac{U_M}{R} \quad (3)$$

Электромагнитная постоянная времени цепи  $T = \frac{L}{R}$ . Параметр нагрузки

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\omega L}{R} = \omega T, \quad (4)$$

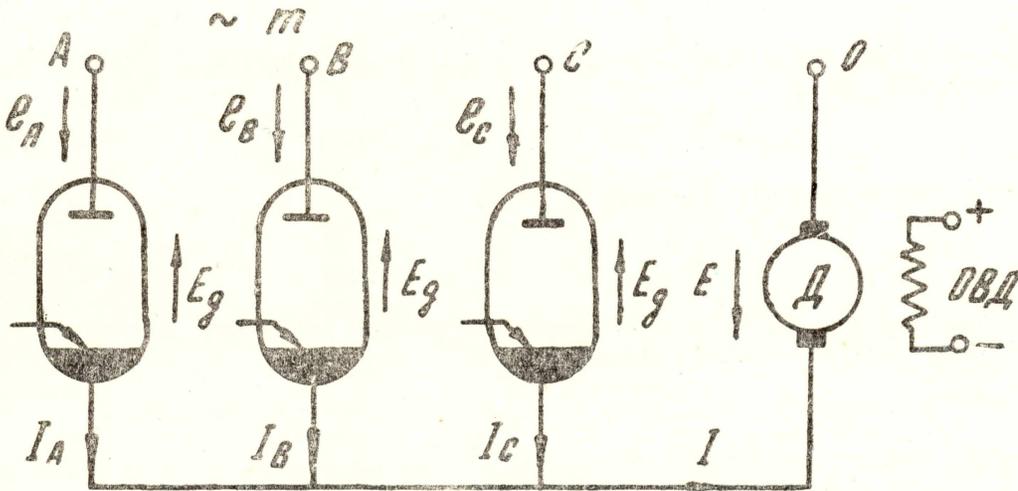


Рис. 1.

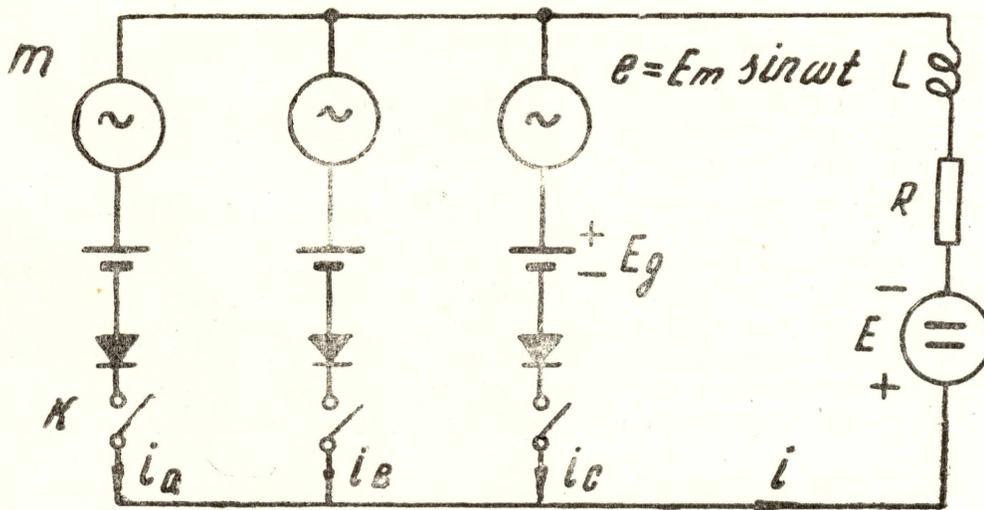


Рис. 2.

где  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота сети переменного тока.

$$\theta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \omega T. \quad (5)$$

Ток в цепи вентиля может возникнуть, если открывающий импульс подается при положительном анодном напряжении, то есть при условии

$$U_m \sin \vartheta_3 - E - E_d \geq 0,$$

или

$$\sin \vartheta_3 \geq \frac{E + E_d}{U_m} = \varepsilon.$$

Угол зажигания  $\vartheta_3$  отсчитывается от начала синусоиды переменного напряжения и определяется для первого горящего анода —

$$\vartheta_3 = \arcsin \varepsilon. \quad (6)$$

Угол горения вентиля равен разности углов погасания и зажигания

$$\lambda = \vartheta_n - \vartheta_3.$$

Для контура цепи одной фазы можно записать уравнение электрического равновесия

$$U_m \sin(\vartheta_3 + \omega t) = E + E_d + iR + L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

или в относительных единицах

$$\sin(\vartheta_3 + \omega t) = \varepsilon + i + T \frac{di}{dt}, \quad (8)$$

решение этого дифференциального уравнения для импульса тока через один вентиль имеет вид [3]

$$i = [\cos \Theta \sin(\vartheta_3 - \Theta + \omega t) - \varepsilon] + [\varepsilon - \cos \Theta \sin(\vartheta_3 - \Theta)] e^{-\omega t \operatorname{ctg} \Theta}. \quad (9)$$

Данное уравнение справедливо для области прерывистых токов при  $i > 0$ .

Граничным режимом работы  $m$ -фазного выпрямителя будет режим, когда

$$i = 0 \quad \text{при} \quad \omega t = \frac{2\pi}{m}.$$

Если  $i > 0$  при  $\omega t = \frac{2\pi}{m}$ , значит мы имеем режим непрерывного тока.

В этом случае уравнение (9) дополнится членом с начальным значением тока  $i_0$  для следующего вступающего в работу анода. Выражение для тока будет иметь вид

$$i = [\cos \Theta \sin(\vartheta_3 - \Theta + \omega t) - \varepsilon] + [\varepsilon - \cos \Theta \sin(\vartheta_3 - \Theta) + i_0] e^{-\omega t \operatorname{ctg} \Theta}. \quad (10)$$

Рассмотрим режим работы выпрямителя при импульсном регулировании скорости в случае, когда число горящих подряд анодов гораздо больше числа пропусков зажигания. Этот режим будет наблюдаться при регулировании скорости двигателя ниже номинальной в небольшом диапазоне (меньше 1,6) и может протекать как с прерывистым, так и непрерывным током при нескольких горящих друг за другом анодах.

При работе выпрямителя в области непрерывных токов имеет место перекрытие анодов, то есть участок  $\gamma$  одновременной работы двух вентилях (рис. 3).

На этом участке ток одного вентиля уменьшается до нуля, а другого увеличивается до некоторого значения. Для практического расчета полагаем, что ток переходит с одного анода на другой мгновенно при значении тока  $i_0$ .

Таким образом, для момента перехода тока с одного анода на другой на основании уравнения (10) можно записать

$$i_0 = \left[ \cos \Theta \sin \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{2\pi}{m} \right) - \varepsilon \right] + \\ + \left[ \varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_3 - \Theta) \right] e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta} + i_0 e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}, \quad (11)$$

откуда

$$i_0 = \frac{\left[ \cos \Theta \sin \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{2\pi}{m} \right) - \varepsilon \right] + \left[ \varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_3 - \Theta) \right] e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}}{1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}}. \quad (12)$$

Подставив значение  $i_0$  в (10) и произведя преобразование, получим

$$i = \left[ \cos \Theta \sin (\vartheta_3 - \Theta + \omega t) - \varepsilon \right] + \\ + \frac{2 \cos \Theta \sin \frac{\pi}{m} \cos \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{\pi}{m} \right)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}} e^{-\omega t \operatorname{ctg} \Theta}. \quad (13)$$

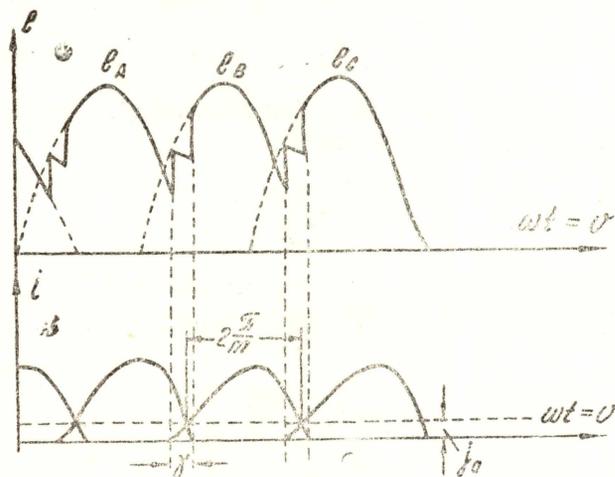


Рис. 3.

Определим площадь одного импульса при работе выпрямителя в области непрерывного тока

$$S_1 = \int_0^{\lambda} i d\vartheta = \int_0^{\lambda} \left\{ \left[ \cos \Theta \sin (\vartheta_3 - \Theta + \omega t) - \varepsilon \right] + \right. \\ \left. + \frac{2 \cos \Theta \sin \frac{\pi}{m} \cos \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{\pi}{m} \right)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}} e^{-\omega t \operatorname{ctg} \Theta} \right\} d\vartheta. \quad (14)$$

Заменяем  $\omega t = \vartheta$  и, проинтегрировав в пределах от 0 до  $\frac{2\pi}{m}$ , получим

$$S_1 = \left[ \cos \vartheta_3 - \cos \left( \vartheta_3 + \frac{2\pi}{m} \right) - \varepsilon \frac{2\pi}{m} \right]. \quad (15)$$

Если считать, что выпрямитель пропускает все импульсы тока, тогда можно записать, что средний ток через двигатель за один период при работе  $m$ -фазного выпрямителя равен

$$i_{\text{срм}} = \frac{m}{2\pi} S_1 = \frac{m}{2\pi} \left[ \cos \vartheta_3 - \cos \left( \vartheta_3 + \frac{2\pi}{m} \right) - \varepsilon \frac{2\pi}{m} \right]. \quad (16)$$

Но при работе выпрямителя в системе импульсного регулирования скорости часть импульсов тока выпрямитель может не пропускать, будучи запертым. При уменьшении скорости двигателя и неизменном напряжении питания амплитуда импульсов тока возрастает, так как э.д.с. двигателя уменьшается. Следовательно, для преодоления того же момента нагрузки с понижением скорости число импульсов на один период уменьшается. Средний ток в двигателе при этом остается неизменным, так как он определяется величиной нагрузки

$$i_{\text{ср}} = \frac{i_{\text{срм}}}{d}, \quad (17)$$

где  $d = \frac{S_1}{S_{1н}}$ , есть отношение площади одного импульса тока при  $\varepsilon$ , соответствующем данной скорости вращения двигателя к площади одного импульса тока при  $\varepsilon = \frac{E_n + E_d}{U_m}$ , где  $E_n$  — номинальная э.д.с. двигателя. Число импульсов тока, приходящихся на один период при данной скорости вращения двигателя,

$$N = \frac{2\pi i_{\text{срм}}}{S_1 d}. \quad (18)$$

Для определения эквивалентного по нагреву тока двигателя найдем квадратичную площадь одного импульса тока

$$S_{1\text{кв}} = \int_0^{\frac{2\pi}{m}} i^2 d\vartheta. \quad (19)$$

Подставив в уравнение (19) значение  $i$  из (13) и проинтегрировав данное выражение, получим

$$\begin{aligned} S_{1\text{кв}} = & \frac{\pi}{m} \cos^2 \Theta - \frac{1}{2} \cos^2 \Theta \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2 \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{\pi}{m} \right) + \\ & + 2\varepsilon \cos \Theta \left[ \cos \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{2\pi}{m} \right) - \cos (\vartheta_3 - \Theta) \right] - \\ & - \frac{\sin^2 2\Theta \sin \frac{\pi}{m} \cos \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{\pi}{m} \right)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \text{ctg} \Theta}} \left\{ \left[ \text{ctg} \Theta \sin \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{2\pi}{m} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \cos \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{2\pi}{m} \right) \right] e^{-\frac{2\pi}{m} \text{ctg} \Theta} - \left[ \text{ctg} \Theta \sin (\vartheta_3 - \Theta) + \cos (\vartheta_3 - \Theta) \right] \right\} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - 4\varepsilon \sin \Theta \sin \frac{\pi}{m} \cos \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{\pi}{m} \right) + \frac{2\pi}{m} \varepsilon^2 + \\
& + \sin 2\Theta \sin^2 \frac{\pi}{m} \cos^2 \left( \vartheta_3 - \Theta + \frac{\pi}{m} \right) \frac{1 + e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}}{1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}}. \quad (20)
\end{aligned}$$

Определим эквивалентный по нагреву ток двигателя

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{S_{1\text{кв}} N}{2\pi}}. \quad (21)$$

Двигатель будет работать не перегреваясь, если выполняется условие

$$I_n \geq (1,1 \div 1,2) I_{\text{экв}}, \quad (22)$$

где  $I_n = \frac{I_n}{I_m}$ .

Коэффициент (1,1 ÷ 1,2) учитывает дополнительные потери в двигателе, связанные с работой при пульсирующем токе.

При работе двигателя в области прерывистого тока в вычислении квадратичной площади одного импульса необходимо опустить значение  $\vartheta_0$  и интеграл брать в пределах от 0 до  $\lambda$ , где  $\lambda$  — угол горения одного вентиля определяется из диаграмм [3].

### Выводы

Рассмотренная методика проверки выбранного двигателя на нагрев при работе в системе импульсного регулирования скорости вращения позволяет рассчитать эквивалентный по нагреву ток двигателя при постоянной нагрузке в зависимости от числа фаз и области работы выпрямителя.

Эта же методика может быть распространена на работу двигателя с выпрямителем, управляемым по фазе. В этом случае угол зажигания выпрямителя будет равен углу регулирования, а число импульсов тока, приходящихся на один период, будет равно числу фаз выпрямителя.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Д. П. Морозов, М. Г. Чиликин, Н. Г. Лысенков и Л. М. Твердин. Новая схема быстродействующего импульсного регулирования в системах с ионными преобразователями. Электричество, № 2, 1958.
2. М. Г. Чиликин, Д. П. Морозов, Л. М. Твердин. Импульсное регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока. Электропривод и автоматизация промышленных установок. ГЭИ, 1960.
3. А. А. Булгаков. Электронные устройства автоматического управления. ГЭИ, 1958.
4. И. Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи. ГЭИ, ч. I, 1951, ч. II, 1955, ч. III, 1956.

Поступила в редакцию  
в мае 1962 г.