

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОМОЩНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

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

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

В настоящее время, наряду с системами регулирования непрерывного действия, широкое распространение получают системы импульсного регулирования. Последние зачастую имеют большее быстродействие, лучшие энергетические показатели, простое устройство, повышенную надежность, малые веса, габариты и стоимость регуляторов. Кроме того, системы импульсного регулирования допускают возможность управления непосредственно от цифровых вычислительных машин и устройств.

Принцип действия систем импульсного регулирования основан на квантовании энергии, поступающей в объект регулирования таким образом, что обеспечивается заданный закон регулирования. Качество регулирования зависит от отношения постоянной времени объекта регулирования к периоду квантования. При большой величине отношения ухудшается быстродействие, при малой — процесс регулирования протекает с большой колебательностью, что может быть недопустимо.

Системы импульсного регулирования электроприводами применяются для регулирования скорости вращения и угла поворота, возбуждения электрических машин, величин усилий в системах с упругими связями и других целей. Благодаря значительной механической инерционности электродвигателей, импульсное регулирование электроприводами может применяться в большом числе случаев.

Наибольшее распространение в промышленных механизмах и устройствах находят электроприводы постоянного тока с импульсным регулированием скорости вращения. Обычно такие электроприводы содержат электродвигатель нормального исполнения и импульсный регулятор, который регулирует поступление электроэнергии в двигатель в виде кратковременных импульсов тока с изменяемой амплитудой или скважностью. Электродвигатель работает как интегрирующее звено, преобразуя поступающие импульсы электроэнергии в непрерывную величину мощности на валу.

Выбор электродвигателя должен производиться по максимальной скорости вращения и моменту с учетом нагрева и условий коммутации. Однако вопросы нагрева и коммутации электродвигателей

в системах импульсного регулирования, представляющие большой практический интерес, в настоящее время исследованы совершенно недостаточно [1, 2, 3].

В настоящей работе рассматриваются вопросы использования маломощных электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения в ионных электроприводах с импульсным регулированием скорости вращения по условиям нагрева и коммутации. Это часть исследований, относящихся к выбору электродвигателя для импульсной следящей системы подачи желобошлифовальных станков, разработанной на кафедре электрификации промпредприятий Томского политехнического института [4, 5].

Следящая система подачи имеет в своей основе однофазную схему питания двигателя постоянного тока через управляемый вентиль—тиратрон (рис. 1). Принцип действия регулятора основан на ключевом управлении тиратроном—по достижении некоторого задан-

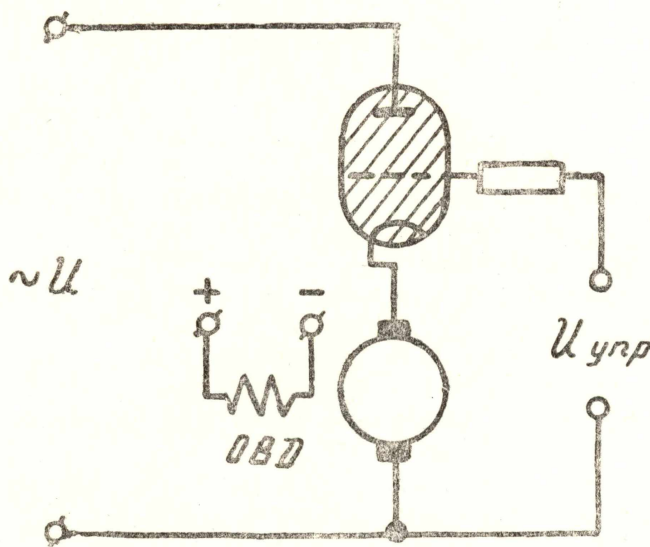


Рис. 1.

ного значения скорости вращения двигателя тиратрон запирается, и скорость начинает падать, снижение скорости вызывает отпирание тиратрона, двигатель получает питание, и скорость растет. Этот процесс повторяется с большой частотой, так что скорость вращения приобретает практически постоянное значение, определяемое управляющим напряжением $U_{упр}$.

Ввиду малой мощности в таких системах нецелесообразно применять многофазные схемы выпрямления, поэтому дальнейшее рассмотрение будет относиться только к однофазным схемам. Однако все выводы при соответствующих пересчетах могут с успехом использоваться и для многофазных схем (без учета перекрытия анодов) [2].

Рассматривая возможности использования в системах импульсного регулирования двигателей нормального исполнения по условиям нагрева и коммутации и не затрагивая вопросов динамики регулирования, будем полагать, что регулятор обеспечивает поддержание постоянной скорости вращения в любой точке диапазона регулирования, то есть величина э. д. с. двигателя E постоянна.

Введем следующие допущения:

а) время ионизации и деионизации не учитывается;

б) реакция якоря, потери на гистерезис и вихревые токи не учитываются;

в) падение напряжения в дуге тиратрона постоянно;

г) цепь якоря состоит из неизменных по величине омического сопротивления и индуктивности.

При этих условиях схему (рис. 1) можно представить схемой замещения (рис. 2), где

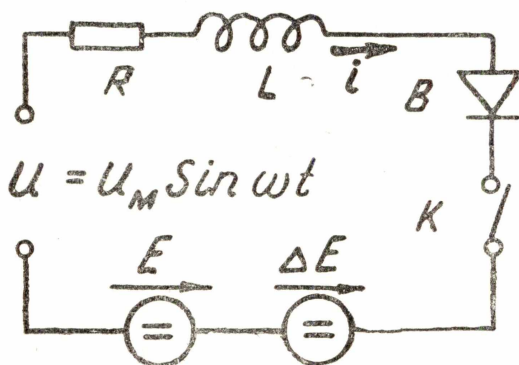


Рис. 2.

R — омическое сопротивление цепи;

L — индуктивность цепи;

B — идеальный вентиль;

ΔE — падение напряжения в дуге тиратрона;

E — э. д. с. якоря двигателя;

U — напряжение источника питания;

i — мгновенные значения тока;

K — автоматический ключ, имитирующий работу регулятора.

Обозначим

$$\epsilon = \frac{E + \Delta E}{U_M}; I_M = \frac{U_M}{R}; I_n = \frac{E + \Delta E}{R}; T = \frac{L}{R}. \quad (1)$$

При замкнутом ключе K ток в цепи возникает при угле зажигания тиратрона ν_3 , отсчитываемом от начала синусоиды (рис. 3)

$$\nu_3 = \arcsin \frac{E + \Delta E}{U_M} = \arcsin \epsilon. \quad (2)$$

Процессы в цепи описываются дифференциальным уравнением

$$U_M \sin(\nu_3 + \omega t) = E + \Delta E + iR + L \frac{di}{dt}. \quad (3)$$

Отсчет времени удобнее вести в угловых единицах

$$\nu = \omega t. \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (3) с учетом обозначений (1,4), справедливое только для $i > 0$, запишется [6]:

$$i = -I_n + I_1 e^{-\frac{\nu}{\omega T}} - I_2 \cos(\nu - \Theta), \quad (5)$$

где

$$I_1 = I_n + I_M \frac{\omega T \cos \nu_3 - \sin \nu_3}{\omega^2 T^2 + 1}, \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{I_M}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}, \quad (7)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \nu_3 + \arctg \omega T. \quad (8)$$

Если в уравнение (5) подставить $i = 0$, то получим значение угла погасания тиратрона при $\nu = \nu_n$ (рис. 3). Продолжительность импульса тока или угол горения тиратрона (рис. 3)

$$\lambda = \nu_n - \nu_3. \quad (9)$$

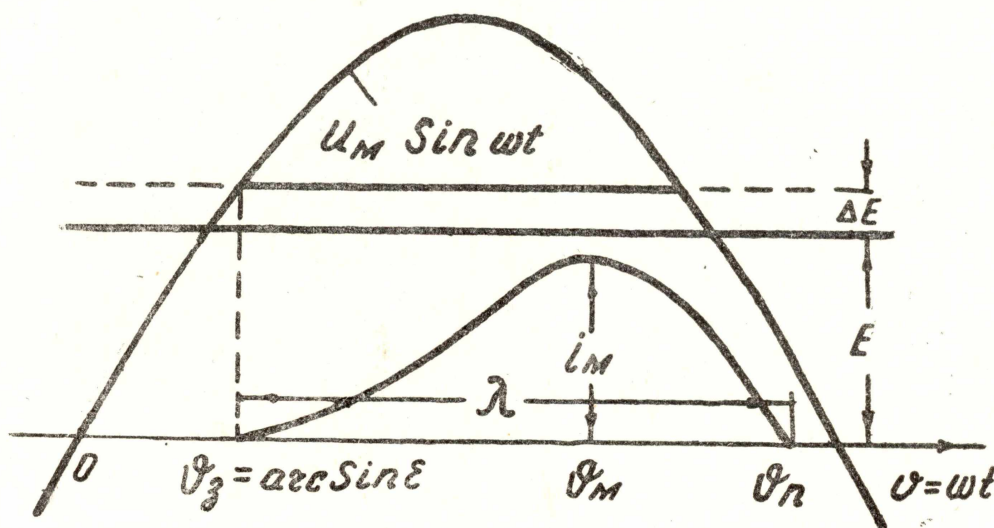


Рис. 3.

Диаграммы угла горения λ в зависимости от ϵ для разных значений ωT приведены на рис. 4 [2]. Продолжительность импульса тока растет с увеличением постоянной времени T и уменьшением относительного напряжения ϵ .

На нагрев и коммутацию сильно влияет величина амплитуды тока i_M , которую можно определить из уравнения (5) подстановкой $\nu = \nu_m$ (рис. 3). Угол ν_m соответствует максимуму тока i_M и находится, как обычно, приравниванием нулю производной от выражения для тока (5). На рис. 5 приведены диаграммы зависимости амплитуды импульсов тока в относительных единицах i_M от величины ϵ для разных значений ωT . За единицу принято значение тока $I_M(1)$

$$i_M = \frac{i_M}{I_M} = i_M \frac{R}{U_M}. \quad (10)$$

Амплитуда тока i_M растет с уменьшением величины ϵ . С увеличением параметра нагрузки ωT амплитуда импульсов тока уменьшается, так как возрастает влияние индуктивности цепи и ток достигает максимума с опозданием относительно максимума напряжения питания.

Рассмотрение диаграмм (рис. 4, 5) позволяет сделать вывод, что при неизменном напряжении питания с уменьшением скорости вращения возрастает энергия, сообщаемая двигателю каждым импульсом тока за счет уменьшения противо э. д. с. двигателя. Это ведет к появлению нежелательных пульсаций на низших скоростях вращения.

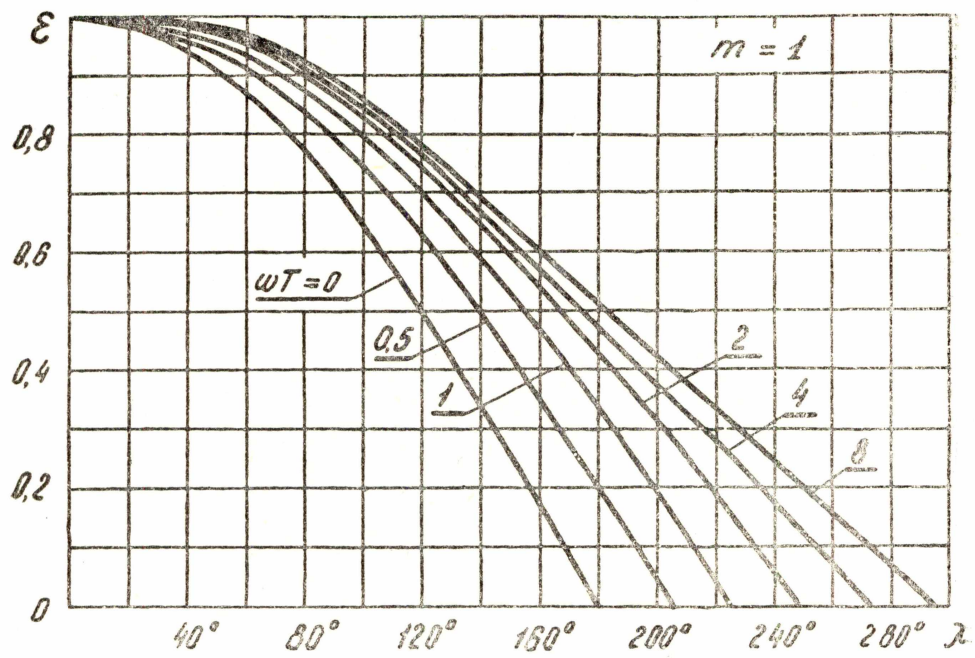


Рис. 4.

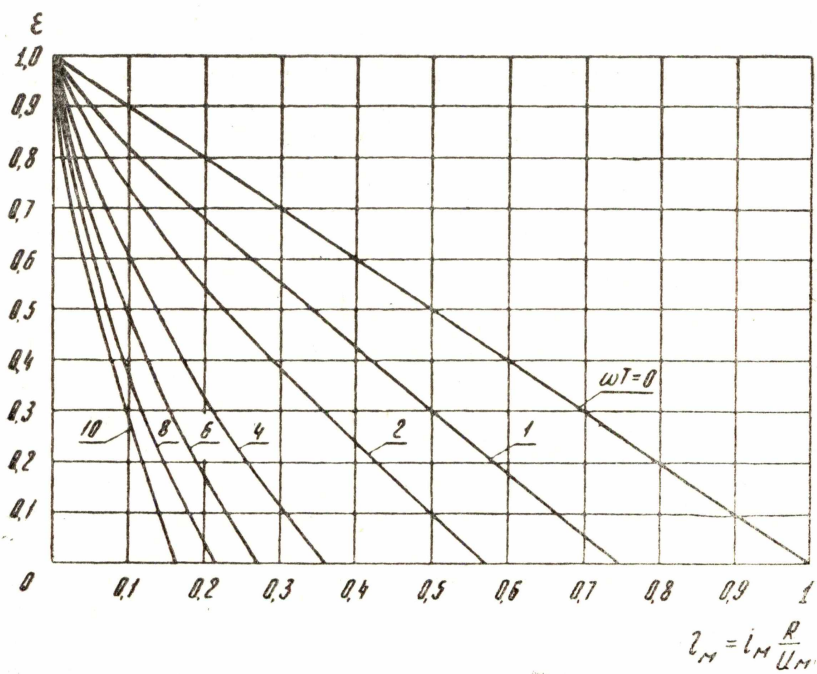


Рис. 5.

Нагрев же зависит не только от амплитуды импульсов тока, но и от частоты последних.

В замкнутой системе регулирования импульсы поступают в двигатель таким образом, чтобы обеспечить средний момент на валу, необходимый для преодоления нагрузки и сообщения двигателю заданной скорости вращения. В установившемся режиме средний ток определяется нагрузкой на валу

$$I_{cp} = \frac{M}{K_m \Phi} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i dt = \frac{K_T S_i}{2\pi}. \quad (11)$$

Число импульсов тока, приходящихся на один период питающего напряжения,

$$K_T = \frac{2\pi}{S_i} I_{cp}. \quad (12)$$

Площадь одного импульса тока S_i с учетом выражения (5, 6, 7, 8, 9) выразится

$$S_i = \int_0^{\lambda} i d\vartheta = \omega T I_1 \left(1 - e^{-\frac{\lambda}{\omega T}} \right) - \lambda I_n - I_2 [\sin(\lambda - \Theta) + \sin \Theta]. \quad (13)$$

Квадратичная площадь одного импульса тока с использованием выражений (5—9) определится

$$\begin{aligned} S_k = \int_0^{\lambda} i^2 d\vartheta = & \lambda I_n^2 - \frac{\omega T}{2} \left(e^{-\frac{2\lambda}{\omega T}} - 1 \right) I_1^2 + \frac{1}{4} (2\lambda + \sin 2\lambda \cos 2\Theta + \\ & + 2 \sin 2\Theta \sin^2 \lambda) I_2^2 + 2 I_1 I_n \omega T (e^{-\frac{\lambda}{\omega T}} - 1) + 2 I_n I_2 [\cos \Theta \sin \lambda + \\ & + \sin \Theta (1 - \cos \lambda)] - 2 I_1 I_2 \frac{\omega T}{1 + \omega^2 T^2} \left\{ \cos \Theta \times \right. \\ & \times [e^{-\frac{\lambda}{\omega T}} (\omega T \sin \lambda - \cos \lambda) + 1] - \sin \Theta [e^{-\frac{\lambda}{\omega T}} (\sin \lambda + \\ & \left. + \omega T \cos \lambda) - \omega T] \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда эквивалентный по нагреву ток

$$I_{\vartheta} = \sqrt{\frac{K_T}{2\pi} \int_0^{\lambda} i^2 d\vartheta} = \sqrt{\frac{S_k}{S_i} I_{cp}}. \quad (15)$$

Снижение скорости приводит к возрастанию нагрева, так как при этом увеличивается амплитуда и продолжительность импульсов тока. Увеличение нагрузки I_{cp} также ведет к росту эквивалентного по нагреву тока. Физически увеличение нагрева вызывается увеличением частоты импульсов тока в двигателе.

Вычисление эквивалентного тока по выражению (15) довольно трудоемко.

Для практических расчетов можно считать, что импульсы тока имеют форму усеченной синусоиды с той же амплитудой i_m и продолжительностью λ .

$$i = i_m \sin \frac{\pi \vartheta}{\lambda} \quad (16)$$

Площадь одного импульса тока

$$S'_i = \int_0^{\lambda} i_m \sin \frac{\pi \vartheta}{\lambda} d\vartheta = \frac{2\lambda i_m}{\pi} \quad (17)$$

Число импульсов тока, приходящееся на один период питающего напряжения,

$$K'_T = \frac{2\pi I_{cp}}{S'_i} = \frac{\pi^2 I_{cp}}{\lambda i_m} \quad (18)$$

Квадратичная площадь импульса тока

$$S'_k = \int_0^{\lambda} i^2 d\vartheta = \frac{\lambda i_m^2}{2} \quad (19)$$

Эквивалентный по нагреву ток

$$I'_9 = \sqrt{\frac{K'_T S'_k}{2\pi}} = 0,886 \sqrt{i_m I_{cp}} \quad (20)$$

Сравнение величин тока, рассчитанных по уравнению (20) и замеренных амперметром с термопреобразователем и осциллографированием во время экспериментов с двигателями СЛ-521, МИ-12Ф и МИ-21С показало, что расхождения не превышают 7%. Такая точность вполне удовлетворительна для практических расчетов.

Учитывая, что в двигателе имеются дополнительные потери от пульсаций тока, номинальный ток двигателя должен быть больше эквивалентного примерно на 10—30%. Условия охлаждения можно считать неизменными во всем диапазоне регулирования скорости, так как маломощные электродвигатели обычно имеют закрытое исполнение без вентиляции.

Таким образом, условия нормальной работы в отношении нагрева будут

$$I_{ном} \geq (1,1 - 1,3) I'_9 \quad (21)$$

Как показали многочисленные эксперименты, при выполнении условия (21) двигатели работали без перегрева.

Из выражения для эквивалентного тока (20) видно, что последний определяется величиной амплитуды импульсов тока i_m и величиной нагрузки I_{cp} . Амплитуда импульсов i_m не зависит от нагрузки и определяется только относительным напряжением ϵ и параметром нагрузки ωT . Это позволяет определить максимально допустимую по условиям нагрева нагрузку на двигатель $I_{cp, доп.}$ в зависимости от величин ϵ для разных ωT . В случае предельной по нагреву нагрузки должно выполняться условие

$$I_{ном} \approx 1,2 I'_9 \quad (22)$$

Подставив (22) в (20), получим

$$I_{ном} = 1,063 \sqrt{i_m I_{cp, доп.}} \quad (23)$$

откуда допустимая по нагреву нагрузка

$$I_{\text{ср.доп}} = \frac{I_{\text{ном}}^2}{1,13 i_{\text{м}}}, \quad (24)$$

или в относительных единицах

$$\frac{I_{\text{ср.доп}}}{I_{\text{ном}}} \left(\frac{U_{\text{м}}}{R I_{\text{ном}}} \right) = \frac{0,885}{i_{\text{м}}}. \quad (25)$$

По выражению (25) и графикам рис. 5 построены зависимости рис. 6, позволяющие определить допустимую по нагреву нагрузку двигателя при известных параметрах цепи и амплитуде питающего

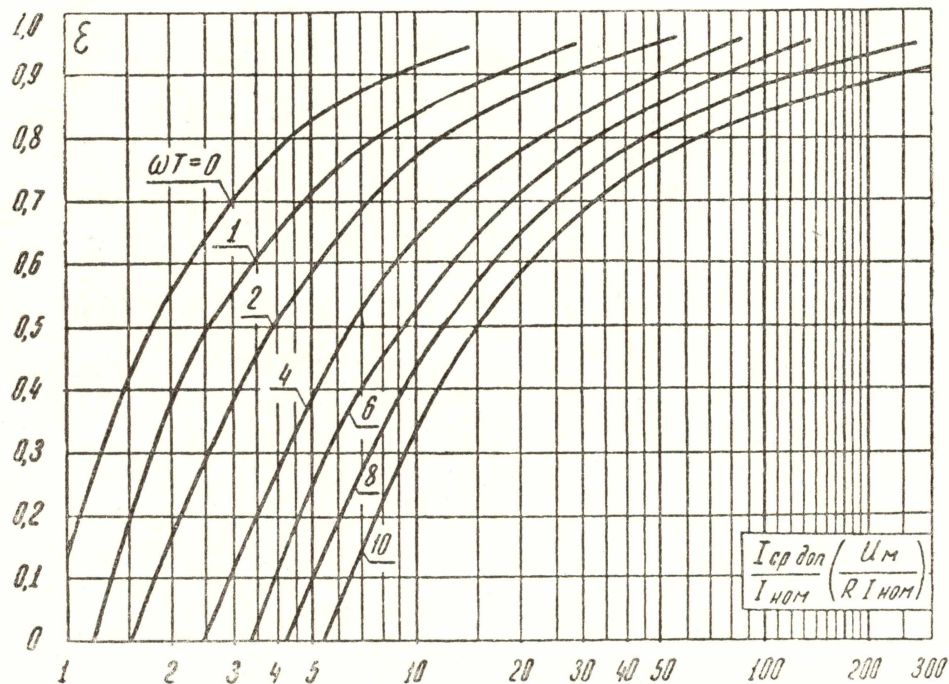


Рис. 6.

напряжения для разных значений относительного напряжения ε , отражающего величину скорости вращения.

$$\varepsilon = \frac{K_e \Phi n + \Delta E}{U_{\text{м}}}. \quad (26)$$

Анализируя зависимость допустимой нагрузки от параметров цепи, напряжения и частоты источника питания, можно указать следующие пути увеличения допустимой нагрузки:

1. Включение в цепь якоря двигателя дополнительной индуктивности. С увеличением постоянной времени T допустимая нагрузка возрастает, так как снижается величина амплитуды импульсов тока, о чем говорилось выше. При этом снижается также пульсация скорости вращения и расширяется диапазон регулирования скорости.

2. Рациональный выбор величины питающего напряжения. Не следует выбирать амплитуду напряжения питания $U_{\text{м}}$ выше, чем требуется для получения максимальной скорости вращения $n_{\text{м}}$ при наибольшей нагрузке $I_{\text{ср м}}$.

Величина $U_{\text{м}}$ может быть определена из уравнения (3) после подстановки э. д. с. двигателя, соответствующей максимальной скоро-

сти, выражения тока i и его производной $\frac{di}{dt}$ из уравнения (5) для значения угла $\vartheta = \frac{\pi}{2}$. Выражение для U_m получается очень сложным. Для практических целей величину амплитуды напряжения можно выбирать по приближенной эмпирической зависимости

$$U_m \approx \sqrt{2}(K_e \Phi n_m + \Delta E + R I_{ср м}). \quad (27)$$

3. Введение добавочных сопротивлений последовательно с якорем двигателя. Это дает эффект практически только при работе на омические нагрузки и против э. д. с., когда $\omega T \approx 0$ (рис. 6). В цепях с $\omega T > 0$ допустимая нагрузка мало зависит от величины сопротивления, так как увеличение R с одной стороны увеличивает допустимую нагрузку (25), но с другой стороны уменьшает параметр нагрузки ωT , вследствие чего растет амплитуда тока i_m и допустимая нагрузка уменьшается (25, рис. 6). Следует также учитывать, что введение добавочных сопротивлений снижает максимальную возможную скорость вращения, а это ведет к необходимости повышения напряжения питания.

4. Повышение частоты питающего напряжения и, следовательно, параметра нагрузки ωT (рис. 6).

Наряду с учетом нагрева, при выборе двигателя для систем импульсного регулирования должны учитываться и условия коммутации. Коммутация коллекторных машин в этих системах имеет существенные особенности, вытекающие из прерывистого характера тока. С одной стороны, возникают значительные реактивные э. д. с., ухудшающие условия коммутации, с другой — коммутируемый ток в некоторые отрезки времени отсутствует, принимает нулевое значение, при этом часть коллекторных пластин не подвергается процессам коммутации, что уменьшает износ и подгорание коллектора и щеток. Вероятно, по этой же причине в рассматриваемой системе не наблюдается появления кругового огня даже при очень больших перегрузках по току (больше 5).

В ряде работ [7, 8, 9, 10] рассмотрены вопросы коммутации коллекторных машин при питании пульсирующим током применительно к тяговым двигателям электровозов. Так, П. А. Золотарев [7] указывает на увеличение допустимой степени искрения в $\sqrt{2}$ раз при питании двигателя переменным током по сравнению со степенью искрения на постоянном токе; в работе В. А. Хвостова [8] указывается, что двигатели постоянного тока малой мощности работают удовлетворительно по условиям коммутации без всяких изменений конструкции при питании пульсирующим током.

Однако вопросы коммутации коллекторных машин постоянного тока при использовании их в системах импульсного регулирования не разработаны, и какие-либо методики или рекомендации для практического выбора и проверки двигателей по коммутации отсутствуют. Вместе с тем, в некоторых случаях, как показывает практика, нагрузка и диапазон регулирования скорости лимитируется как раз условиями коммутации, а не нагревом двигателя.

Интенсивность искрения в двигателях электроприводов с импульсным регулированием зависит от амплитуды и частоты импульсов тока и скорости вращения. С увеличением амплитуды импульсов тока, определяющей максимальную разрываемую под щеткой мощность, степень искрения возрастает. Увеличение скорости вращения также

ведет к возрастанию интенсивности искрения, так как возрастает число коллекторных пластин, коммутирующих ток в области амплитудных значений. С ростом нагрузки увеличивается частота импульсов тока и интенсивность искрения повышается.

Износ коллектора и щеток определяется как средним значением разрываемой мощности $P_{\text{ср}}$, так и амплитудой и частотой импульсов максимальной разрываемой мощности $P_{\text{м}}$. Характер распределения величины разрываемой мощности (и степени искрения) при работе двигателя в системе импульсного регулирования представлен на рис. 7.

Наибольшим воздействиям коллектор и щетки будут подвергаться при максимальной разрываемой мощности, причем износ и подгорание коллекторных пластин оказываются неравномерными по окружности коллектора.

Для выяснения допустимой нагрузки по условиям коммутации были проведены сравнительные экспериментальные исследования при

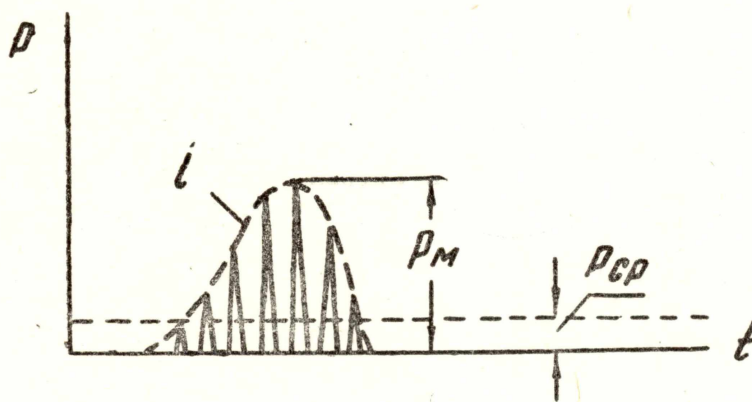


Рис. 7.

питании двигателя постоянным током и при работе в системе импульсного регулирования скорости по схеме рис. 1. Исследованиям подвергались три маломощных двигателя типов МИ-21 С, МИ-12 Ф и СЛ-521. Нагрузка изменялась так, чтобы получить примерно одинаковую интенсивность искрения. Оценка степени искрения производилась визуально по появлению видимого искрения при рассеянном освещении. Как известно, визуальная оценка соответствует максимальным значениям разрываемой мощности, при которой коллектор и щетки подвергаются наибольшему разрушению. Кроме того, при максимальных разрываемых мощностях в контактном слое щеток могут образовываться твердые частицы карбида кремния, которые в дальнейшем сильно ускоряют износ коллектора и ухудшают коммутацию. Появление искрения регистрируется, как показали опыты, с достаточной точностью. Отклонение значений тока, при котором возникает видимое искрение, не превышает 10—20 % для указанных типов двигателей. Таким образом, визуальная оценка коммутации по появлению видимого искрения для сравнительных испытаний может быть признана удовлетворительной.

Вместе с тем, принятие визуальной оценки в какой-то мере объясняется трудностями применения в данном случае объективных методов оценки коммутации. Попытки применить метод М. Ф. Карасева — В. П. Суворова [11] окончились неудачно ввиду трудности изготовления в условиях экспериментирования миниатюрного устройства со вспомогательной щеткой для малогабаритных машин типа

СЛ-521, МИ-12Ф и МИ-21С. Применение метода, который рекомендует Л. Л. Лавринович [12], основанного на замере среднего значения высокочастотных составляющих напряжения между разноименными щетками, встретило затруднения в выделении коммутационных напряжений из широкого спектра частот, в том числе и высокочастотных, который возникает в импульсных ионных системах электропривода во время работы. Наконец, исследование коммутации с применением фотоэлектрического индикатора искрения типа ИИ-1 затрудняется тем, что замеряемое прибором среднее значение интенсивности искрения само по себе является недостаточным для оценки коммутации в импульсном режиме, а зафиксировать распределение искрения по коллектору в импульсном режиме питания невозможно, ввиду несинхронности импульсов тока, протекающих через якорь двигателя. Задача может быть решена применением специального устройства для фотосъемки с экрана индикатора или другими способами, так чтобы получить картину распределения интенсивности искрения по коллектору для значительного отрезка времени и тем самым произвести оценку условий коммутации.

Однако изучение коммутации в коллекторных машинах при импульсном регулировании, разработка и создание аппаратуры для объективной оценки условий коммутации, обоснование критериев оценки коммутации при работе в импульсных системах выходят за рамки данной работы и должны явиться предметом самостоятельного исследования.

В данной работе применяется визуальный метод, дающий лишь ориентировочную оценку допустимой нагрузки по условиям коммутации в импульсной системе по сравнению с допустимой нагрузкой на постоянном токе, которая указывается в паспортных данных машин.

Результаты экспериментального определения равных интенсивностей искрения на постоянном токе и в системе импульсного авторегулирования представлены на рис. 8, 9, 10. Сплошной кривой показаны зависимости тока якоря, при котором возникает видимое искрение, от скорости вращения при питании постоянным током. Пунктирной кривой показана зависимость среднего значения тока в системе импульсного регулирования, штрихпунктирной кривой — амплитудные значения тока.

По графикам рис. 8, 9, 10 и паспортным данным испытуемых двигателей составлена табл. 1.

Таблица 1

Тип двигателя				СЛ-521	МИ-12Ф	МИ-21С
величина		обозначения	единицы			
Номинальные значения	Тока	$I_{\text{ном}}$	a	1,1	1,46	2,4
	Скорости	$n_{\text{ном}}$	об/мин	3000	2000	35000
	Напряжения якоря	$U_{\text{ном}}$	v	110	110	220
	Мощности	$P_{\text{ном}}$	$вт$	77	120	370
Максимальный допустимый ток		I_g	a	1,5	3,8	6,15
Ток возникновения искрения при $n_{\text{ном}}$		$I_{\text{и}}$	a	1,1	3	4
Отношение токов		K_i	1	1,36	1,26	1,54
$K_i = \frac{I_g}{I_{\text{и}}}$						

Допустимый по условиям коммутации ток в системе импульсного регулирования можно принять равным

$$I_{\text{дк}} = K_i I_{\text{и}}. \quad (28)$$

Или в относительных единицах

$$\frac{I_{\text{дк}}}{I_{\text{ном}}} = K_i \frac{I_{\text{и}}}{I_{\text{ном}}}. \quad (29)$$

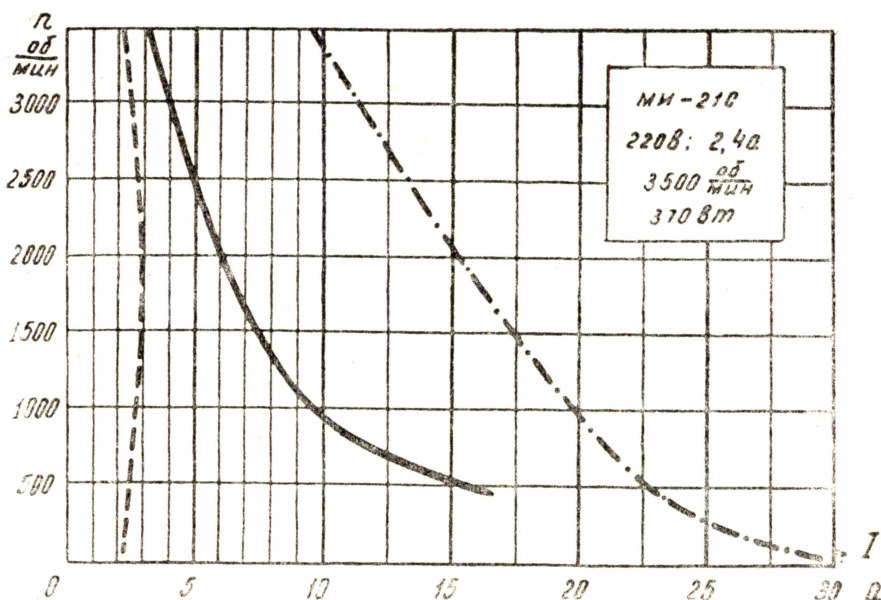


Рис. 10.

На основании графиков рис. 8, 9, 10 и табл. 1 на рис. 11 построены зависимости допустимой нагрузки на двигатели указанных типов в зависимости от скорости вращения при условии, что амплитуда питающего напряжения выбрана так, чтобы обеспечить номинальную скорость вращения при номинальной нагрузке и отсутствии пропусков зажигания тиристора (т. е. в режиме обычного неуправляемого выпрямителя). На рис. 12 представлены допустимые амплитуды импульсов тока в зависимости от скорости вращения.

Коммутацию предлагается считать удовлетворительной, если при заданной скорости вращения средний ток $I_{\text{ср}}$ и амплитуда тока $I_{\text{м}}$ не превышают допустимых значений

$$I_{\text{ср}} \leq I_{\text{дк}}, \quad (30)$$

$$i_{\text{м}} \leq i_{\text{мк}}. \quad (31)$$

Значения токов $I_{\text{ср}}$ и $i_{\text{м}}$ приводятся в расчете двигателя на нагрев, значения $I_{\text{дк}}$ и $i_{\text{мк}}$ легко определяются по графикам рис. 11, 12. При использовании двигателей других типов можно ориентироваться по зависимостям для одного из приведенных типов двигателя, наиболее близкого по параметрам к используемому.

Таким образом, коммутация двигателей зависит от тех же величин, что и нагрев—от нагрузки, скорости вращения, амплитуды импульсов тока. Следовательно, выбор и проверка маломощных двигателей по нагреву и условиям коммутации, при использовании их в системах импульсного регулирования скорости вращения, может производиться на основании единой методики расчетов.

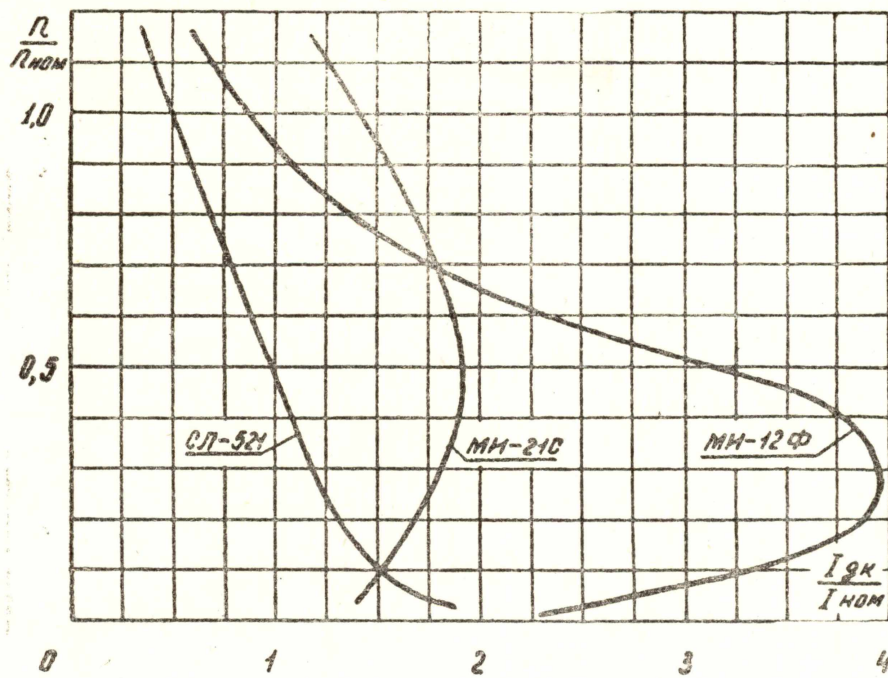


Рис. 11.

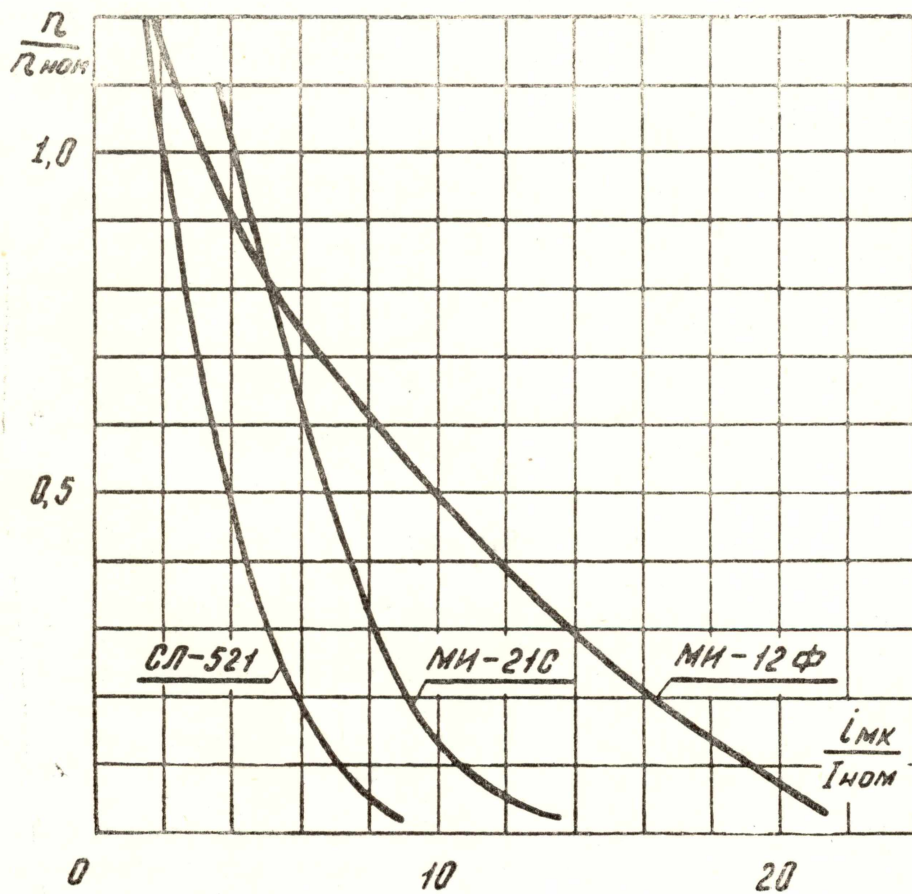


Рис. 12

Для практических целей рекомендуется следующая инженерная методика проверки двигателей малой мощности по нагреву и коммутации в системах ионных электроприводов с импульсным регулированием скорости вращения и однофазной схемой выпрямления:

1. Вычислить для минимальной скорости вращения величины относительного напряжения и параметра нагрузки

$$\varepsilon_{\min} = \frac{K_e \Phi n_{\min} + \Delta E}{U_M}; \quad \omega T = 2\pi f \frac{L}{R}.$$

2. Из диаграмм рис. 5 по $\varepsilon_{\min}$ и ωT определить амплитуду импульсов тока i_M .

3. Для заданной нагрузки $I_{\text{ср}}$ вычислить по выражению (20) эквивалентный по нагреву ток

$$I'_3 = 0,886 \sqrt{i_M I_{\text{ср}}}.$$

4. Проверить двигатель на нагрев по выражению (21)

$$I_{\text{ном}} \geq (1,1 - 1,3) I'_3.$$

5. Используя графики рис. 11 и 12, проверить двигатель по условиям коммутации по выражениям (30, 31).

$$I_{\text{ср}} \leq I_{\text{лк}},$$

$$i_M \leq i_{\text{мк}}.$$

Выбор двигателя производится предварительно по максимальной скорости вращения и моменту. Далее производится выбор величины напряжения питания (27) и затем проверка на нагрев и коммутацию по вышеуказанной методике.

В заключении следует отметить, что рассмотренная система ионного электропривода с импульсным регулированием скорости вращения предназначена для установок малой мощности (от десятков до нескольких сотен ватт) и может использоваться в различных сервоприводах, следящих системах и так далее. Электродвигатель в этих системах не может использоваться полностью по мощности, ввиду тяжелых условий нагрева и коммутации. Однако необходимость завышения мощности двигателей не сказывается сколь-нибудь существенно на стоимости и габаритах установок при таких малых мощностях и вполне оправдывается упрощением систем регулирования и увеличением надежности их работы.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Двигатели малой мощности могут использоваться в системах импульсного регулирования при нагрузках меньше номинальной без каких-либо дополнительных устройств.

2. Допустимая нагрузка на двигатель увеличивается при включении добавочных индуктивностей, увеличении частоты и уменьшения амплитуды питающего напряжения.

3. Нагрев и условия коммутации двигателя в системе импульсного регулирования зависят от нагрузки и амплитуды импульсов тока.

4. Предложена инженерная методика выбора двигателей для систем импульсного регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Г. Чиликин, И. И. Петров. Проблемы автоматизированного электропривода в текущем семилетии (1959—1965 гг.) Электропривод и автоматизация промышленных установок. ГЭИ, 1960.
2. А. А. Булгаков. Электронные устройства автоматического управления. ГЭИ, 1958.
3. Д. П. Морозов, М. Г. Чиликин, Н. Г. Лысенков и А. М. Твердин. Новая схема быстродействующего импульсного регулирования в системах с инвентными преобразователями. Электричество, № 2, 1958.
4. В. А. Бейнарович, А. И. Зайцев. Автоматизация желобошлифовальных станков. Известия ТПИ, том 115, 1960.
5. В. А. Бейнарович, А. И. Зайцев. Устройство для автоматического регулирования скорости поперечной подачи шлифовального круга желобошлифовального станка. Авторское свидетельство, № 131746, Боллеть изобретений, № 1, 1961.
6. А. А. Сиротин. Автоматическое управление электроприводами. ГЭИ, 1958.
7. П. А. Золотарев. О допустимой степени искрения щеток тяговых электродвигателей пульсирующего тока. Известия вузов, Электромеханика, № 11, 1959.
8. Б. С. Хвостов. Коммутация двигателя постоянного тока при работе однофазного выпрямителя. Известия вузов, Электромеханика, № 11, 1959.
9. В. Е. Скобелев. Физические особенности коммутации тяговых двигателей при пульсирующем токе. Известия вузов, Электромеханика, № 8, 1958.
10. В. Л. Дуденков. Исследование коммутации однофазных коллекторных тяговых двигателей промышленной частоты, Известия вузов, Электромеханика, № 11, 1959.
11. М. Ф. Карасев. Коммутация коллекторных машин постоянного тока. ГЭИ, 1961.
12. Л. Л. Лавринович. Настройка коммутации при помощи измерительных приборов. Вестник электропромышленности, № 4, 1959.

Поступила в редакцию
в мае 1962 г.