

К РАСЧЕТУ НЕКОТОРЫХ МУТАТОРОВ НА ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

А. И. ЗАЙЦЕВ, В. Н. МИШИН

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Вентильные преобразователи переменного тока в постоянный получили большое распространение в различных областях техники, особенно в последнее время, что связано с развитием полупроводникового приборостроения. Однако при необходимости регулирования выпрямленного напряжения в широких пределах коэффициент мощности установки оказывается низким. В целях улучшения энергетических характеристик подобных систем в мутаторах с малым числом фаз при активно-индуктивном характере нагрузки предлагается последнюю шунтировать неуправляемым вентилем [1], через который разряжается энергия электромагнитного поля индуктивности после прохождения соответствующего фазного напряжения сети переменного тока через нуль в отрицательную область. Кроме того, были созданы системы с несимметричным управлением вентилями, а также многочисленные схемы с искусственной коммутацией, в последних угол зажигания очередного вентиля оказывается опережающим, что позволяет им работать с отдачей в сеть реактивной мощности. Из систем с искусственной коммутацией нашли применение лишь мощные установки с относительно малым диапазоном регулирования выпрямленного напряжения, разработанных в Киевском политехническом институте под руководством И. М. Чиженко.

Появление достаточно мощных транзисторных ключей, тиристорных преобразователей с искусственной коммутацией, а также разработка полностью управляемых кремниевых вентилях дают возможность создавать преобразовательные устройства и на относительно небольшие мощности, в которых устраняется указанный выше основной недостаток вентильных схем.

В обычных вентильных системах с шунтирующей цепью длительность импульсов тока через вентили в непрерывном режиме тока нагрузки для данной схемы преобразователя однозначно определяется углом включения (зажигания) вентилях, в прерывистом — углом включения и параметрами нагрузки. В мутаторах, где имеется возможность тем или иным способом [1], [3] выключать проводящий силовой вентиль раньше, чем создадутся условия для естественной коммутации, продолжительность работы вентилях будет зависеть не только от схе-

мы выпрямления, но и от сигналов схемы управления. Поэтому здесь можно работать с некоторым оптимальным для данного режима коэффициентом мощности, варьируя соответствующим образом в каждом конкретном случае углы включения и продолжительность включения силовых вентилялей.

Использование в вентильных системах полностью управляемых элементов позволяет также в случае активно-индуктивной нагрузки работать с отрицательными углами включения; здесь некоторое время после включения очередного силового вентиля будет иметь место инверторный режим с отдачей в сеть энергии, запасенной в индуктивности нагрузки. В подобных установках надобность в шунтирующем вентиле отпадает, и их режим работы соответствует максимальной отдаче реактивной энергии.

Таким образом, возможность тем или иным способом прерывать ток в проводящем силовом вентиле (выключать его) позволяет создавать мутаторы для преобразования переменного тока в постоянный с более высокими энергетическими характеристиками.

Основное отличие подобных систем с полупроводниковыми приборами заключается в том, что мощность, идущая на их выключение, мала по сравнению с ионными вентилями, время выключения незначительно, что позволяет без большой погрешности рассматривать их как системы с мгновенно действующими ключами.

В данной работе исследуются режимы цепей постоянного и переменного тока m -фазного мутатора с шунтирующей цепью на вентилях, которые могут выключаться тем или иным способом. При этом сам способ выключения не рассматривается и не учитывается энергия, идущая на выключение приборов.

При анализе примем следующие допущения:

- 1) питание системы осуществляется от сети бесконечной мощности, то есть ее активное и индуктивное сопротивления равны нулю;
- 2) включение и выключение вентилялей происходит мгновенно и без затрат дополнительной энергии;

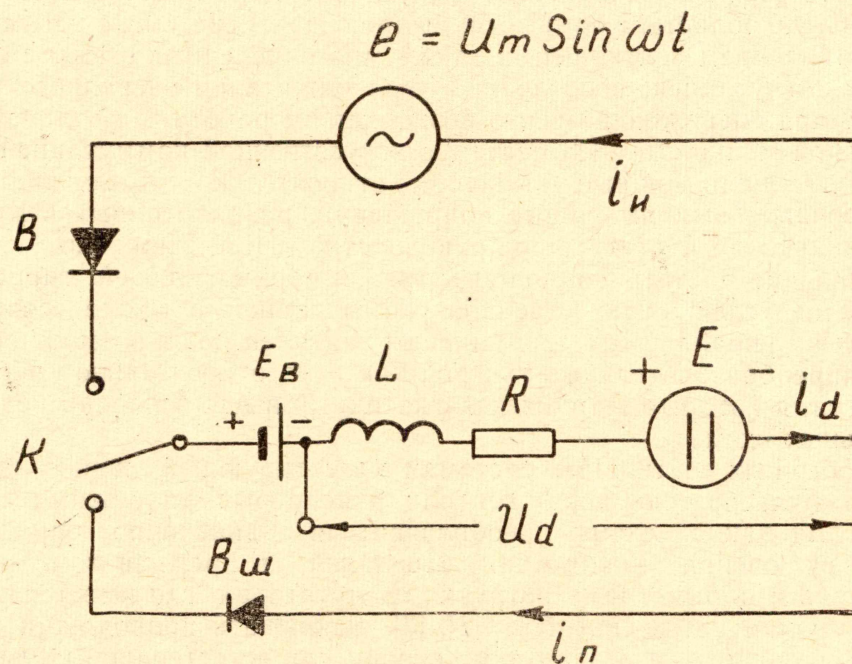


Рис. 1

3) падения напряжения на вентилях мутатора являются постоянными и равными друг другу;

4) нагрузка состоит из неизменных по величине индуктивности, омического сопротивления и э. д. с. постоянного тока.

При сделанных допущениях эквивалентная схема замещения в однофазном исполнении будет иметь вид, изображенный на рис. 1. На этой схеме управляемый клапан представляется автоматическим выключателем К, который в соответствующие моменты времени периодически мгновенно производит необходимую коммутацию в главной и шунтирующей цепях. При этих выключениях, согласно принятым допущениям, ток нагрузки мгновенно переходит с неизменной величиной в силовую или шунтирующую цепи, оставаясь неизменным по величине и направлению в нагрузке. Падения напряжения на клапанах учитываются источником э. д. с. E_v без внутреннего сопротивления, включенным против тока.

В соответствии со схемой замещения время, в течение которого клапан К замыкает главную цепь, будем называть временем включения, а время, в течение которого клапан замыкает шунтирующую цепь, — временем паузы.

Для упрощения выводов и удобств в использовании полученных результатов примем при исследовании метод относительных единиц, развитый применительно к клапанным системам А. А. Булгаковым [2]. В качестве базовых величин примем амплитуду синусоидального напряжения сети U_m и ток короткого замыкания, определяемый амплитудой напряжения сети и активным сопротивлением цепи постоянного тока.

Обозначим через относительное напряжение

$$\varepsilon = \frac{E + E_v}{U_m} \quad (1)$$

и относительный ток

$$j = \frac{i}{I_m} = \frac{iR}{U_m}, \quad (2)$$

где E — э. д. с. цепи постоянного тока;

E_v — падение напряжения на соответствующем клапане;

U_m — амплитуда синусоидального напряжения сети;

i — мгновенное значение тока;

I_m — базовое значение тока;

R — активное сопротивление цепи нагрузки.

Электромагнитную инерцию цепи постоянного тока будем учитывать параметром нагрузки.

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{\omega L}{R} = \omega T, \quad (3)$$

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

L — индуктивность нагрузки;

T — электромагнитная постоянная времени нагрузки.

Так же как и в обычных клапанных системах, ток нагрузки рассматриваемых преобразователей может быть как непрерывным, так и дискретным (прерывистым). В первом случае минимально возможный угол включения, отсчитываемый от начала положительных полуволн синусоид напряжения сети, определяется величиной напряжения сети

$$U_m \sin \vartheta_v \geq 0 \quad (4)$$

или

$$\vartheta_v \geq 0. \quad (4a)$$

Аналитически процессы в схеме на рис. 1 описываются следующей системой дифференциальных уравнений при включении и паузе соответственно.

$$\left. \begin{aligned} U_m \sin(\vartheta_b + \omega t) &= E + E_b + iR + L \frac{di}{dt} \\ 0 &= E + E_b + iR + L \frac{di}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где t — время, отсчитываемое от момента замыкания той или иной цепи.

Разделив оба уравнения системы (5) на U_m и заменив время угловой координатой $\vartheta = \omega t$, получим в относительных единицах.

$$\left. \begin{aligned} \sin(\vartheta_b + \vartheta) &= \varepsilon + j + \operatorname{tg} \Theta \frac{dj}{d\vartheta} \\ 0 &= \varepsilon + j + \operatorname{tg} \Theta \frac{dj}{d\vartheta} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решение дифференциальных уравнений (6) даст следующие выражения для тока нагрузки в моменты включения и паузы в относительных единицах

$$\left. \begin{aligned} j_n &= [\cos \Theta \sin(\vartheta_b - \Theta + \vartheta) - \varepsilon] + [\varepsilon - \cos \Theta \sin(\vartheta_b - \Theta) + \\ &\quad + j_{он}] e^{-\vartheta \operatorname{ctg} \Theta} \\ j_n &= (\varepsilon + j_{он}) e^{-\vartheta \operatorname{ctg} \Theta} - \varepsilon \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $j_{он}$ и $j_{оп}$ — начальные значения токов в моменты включения и паузы соответственно.

Начальные значения токов в непрерывном режиме найдутся как

$$\left. \begin{aligned} j_{сп} &= j_n \quad \text{при} \quad \vartheta = \lambda \\ j_{си} &= j_n \quad \text{при} \quad \vartheta = \frac{2\pi}{m} - \lambda \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где λ — продолжительность включения силовых вентилялей;
 m — число фаз мутатора.

Подставив условия (8) в систему уравнений (7), получим

$$\left. \begin{aligned} j_{он} &= [\cos \Theta \sin(\vartheta_b - \Theta + \lambda) - \varepsilon] + [\varepsilon - \cos \Theta \sin(\vartheta_b - \Theta) + \\ &\quad + j_{си}] e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \\ j_{он} &= (\varepsilon + j_{он}) e^{-\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda\right) \operatorname{ctg} \Theta} - \varepsilon \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

откуда начальные значения соответствующих токов определяются как

$$j_{он} = \frac{\cos \Theta [e^{\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \sin(\vartheta_b - \Theta + \lambda) - \sin(\vartheta_b - \Theta)] - \varepsilon}{e^{\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta} - 1}, \quad (10)$$

$$j_{оп} = \frac{\cos \Theta [\sin(\vartheta_B - \Theta + \lambda) - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \sin(\vartheta_B - \Theta)]}{1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}} - \varepsilon \quad (11)$$

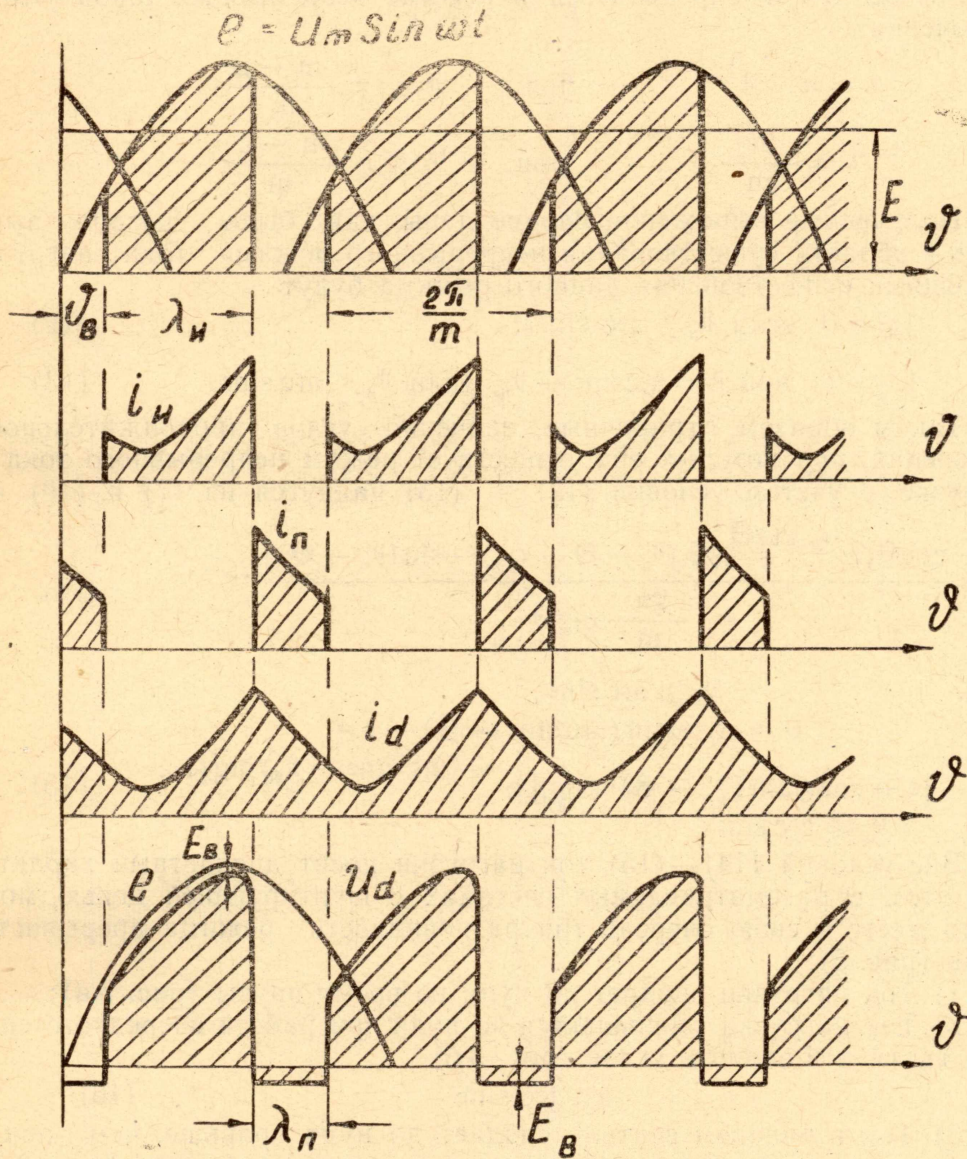


Рис. 2

Форма импульсов тока в различных звеньях рассматриваемого мутатора при непрерывном токе нагрузки показана на рис. 2.

В установившемся режиме работы преобразователя максимальный угол продолжительности включения вентилей равен $\frac{2\pi}{m}$, в этом случае режим паузы отсутствует, и ток при принятых допущениях мгновенно переходит с одного силового вентиля на другой. В связи с этим следует отметить, что наличие шунтирующего вентиля необходимо лишь при относительно большом диапазоне регулирования средневыпрямленного напряжения. Если же при выключении одного силового

вентиля одновременно включается другой, надобность в шунтирующей цепи отпадает.

Выражения (7) справедливы и для обычных преобразовательных систем с шунтирующей цепью, работающих с отстающим углом включения. В этом случае продолжительность включения вентиля той или иной фазы будет определяться в режиме непрерывных токов углами включения

$$\lambda = \pi - \vartheta_v \quad \text{при} \quad \vartheta_v \geq \pi \frac{m-2}{m}$$

и

$$\lambda = \frac{2\pi}{m} \quad \text{при} \quad \vartheta_v \leq \pi \frac{m-2}{m}$$

Полученные выражения справедливы, как было указано выше, лишь в области существования непрерывного режима тока нагрузки. Условиями существования данного режима будут

$$j_{on} \geq 0, \text{ если } \vartheta_v \geq \arcsin \varepsilon, \quad (12)$$

$$\text{и } j_{on} \geq 0 \text{ при } \vartheta = \arcsin \varepsilon - \vartheta_v, \text{ если } \vartheta_v \leq \arcsin \varepsilon. \quad (13)$$

Таким образом, граничные значения углов продолжительности включения, при которых еще существует режим непрерывного тока в нагрузке, с учетом условий (12) — (13) найдутся из (7) и (10) как

$$0 = \frac{\cos \Theta [e^{\lambda_{rp} \operatorname{ctg} \Theta} \sin(\vartheta_v - \Theta + \lambda_{rp}) - \sin(\vartheta_v - \Theta)]}{e^{\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta} - 1} - \varepsilon, \quad (14)$$

$$\text{если } \vartheta_v \geq \arcsin \varepsilon,$$

$$\text{и } 0 = \cos \Theta \sin(\arcsin \varepsilon - \Theta) - \varepsilon +$$

$$+ [\varepsilon - \cos \Theta \sin(\vartheta_v - \Theta) + j_{on}] e^{-(\arcsin \varepsilon - \vartheta_v) \operatorname{ctg} \Theta}, \quad (15)$$

$$\text{если } \vartheta_v \leq \arcsin \varepsilon:$$

Вне условий (14) — (15) ток нагрузки носит дискретный характер. При этом в рассматриваемых системах с шунтирующей цепью могут иметь место в свою очередь три разновидности режима прерывистых токов (рис. 3).

1) Ток нагрузки спадает до нуля во время паузы (рис. 3 а);

2) Ток нагрузки уменьшается до нуля при работе очередного силового вентиля в области углов (рис. 3 б)

$$\vartheta < \arcsin \varepsilon \quad (16)$$

3) Ток в силовом вентиле спадает до нуля раньше, чем придет команда на его искусственное или естественное выключение (рис. 3, в).

Последний вариант режима прерывистых токов, имеющий место и в вентильных системах с обычным (запаздывающим) углом управления, подробно исследован в работе А. А. Булгакова [2] и здесь не рассматривается.

Разберем области существования двух первых случаев режима прерывистых токов более детально.

1. Ток нагрузки уменьшается до нуля во время паузы

Здесь минимально возможные углы включения силовых вентилях определяются величинами Э. д. с. постоянного тока в цепи нагрузки и падением напряжения на силовых вентилях

$$\vartheta_v \geq \arcsin \varepsilon \quad (17)$$


$$j_{\text{оп}} = [\cos \Theta \cdot \sin(\vartheta_{\text{в}} - \Theta + \lambda) - \varepsilon] + [\varepsilon - \cos \Theta \cdot \sin(\vartheta_{\text{в}} - \Theta)] e^{-\lambda c_{\text{т}} \Theta}, \quad (18)$$

то есть окончательное выражение для тока нагрузки в режиме паузы будет иметь вид

Граничными условиями существования данного режима прерывистых токов будут

9

если $\vartheta'_B \geq \arcsin \varepsilon$, и

$$j_n = 0 \quad \text{при } \vartheta = \frac{2\pi}{m} - \arcsin \varepsilon - \lambda_{rp1} + \vartheta'_B, \quad (21)$$

если $\vartheta'_B < \arcsin \varepsilon$,

где λ_{rp1} — продолжительность включения силовых вентилях, при которой имеет место граничный случай существования рассматриваемого режима прерывистых токов;

ϑ'_B — угловая координата, соответствующая подаче на очередной силовой вентиль включающего сигнала.

Из условия (21) следует, что в данном режиме прерывистых токов с приходом управляющего сигнала силовой вентиль не вступит в работу, так как величина переменного напряжения меньше суммы падения напряжения на вентиле и э. д. с. в цепи постоянного тока, а индук-

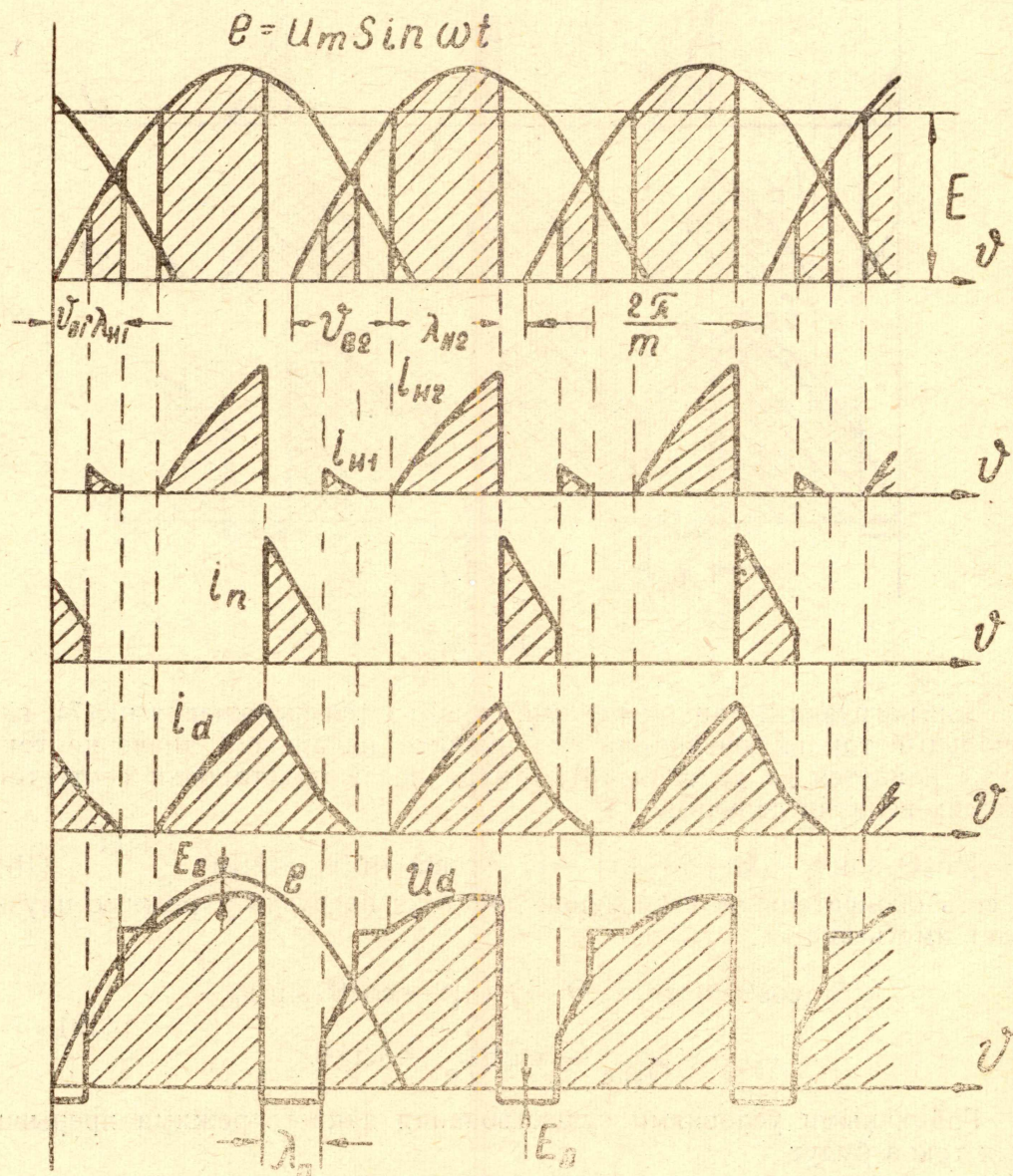


Рис. 36

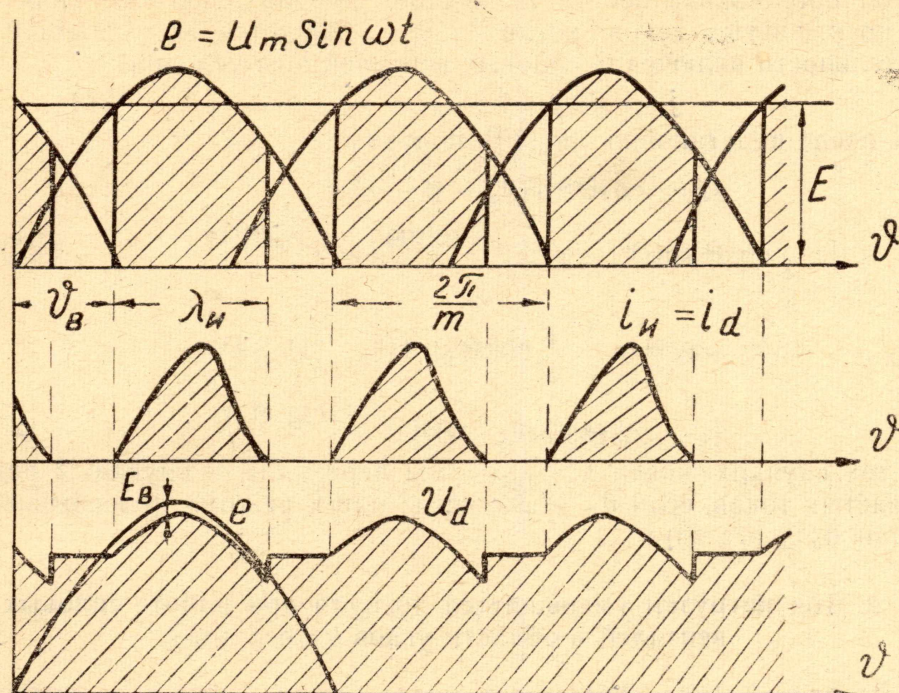


Рис. 3в

тивность нагрузки уже успела разрядиться. При сохранении управляющего сигнала на включение вентиль начнет проводить ток, начиная с момента времени, соответствующего

$$\vartheta = \vartheta_B = \arcsin \varepsilon$$

Подставив условия (20) — (21) в выражение (19), получим уравнения для нахождения граничных углов продолжительности включения силовых вентиля

$$0 = \{ \cos \Theta \cdot \sin (\vartheta_B - \Theta + \lambda_{rp1}) + \\ + [\varepsilon - \cos \Theta \cdot \sin (\vartheta_B - \Theta)] e^{-\lambda_{rp1} \operatorname{ctg} \Theta} \} e^{-\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda_{rp1} \right) \operatorname{ctg} \Theta} - \varepsilon \quad (22)$$

$$\text{при } \vartheta'_B = \vartheta_B \geq \arcsin \varepsilon \quad \text{и}$$

$$0 = \{ \cos \Theta \cdot \sin (\vartheta_B - \Theta + \lambda_{rp1}) + [\varepsilon - \cos \Theta \cdot \sin (\vartheta_B - \Theta)] \times \\ \times e^{-\lambda_{rp1} \operatorname{ctg} \Theta} \} e^{-\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda_{rp1} - \arcsin \varepsilon + \vartheta'_B \right) \operatorname{ctg} \Theta} - \varepsilon \quad (23)$$

$$\text{при } \vartheta'_B < \arcsin \varepsilon .$$

Для анализа работы мутатора требуется знание не только границ соответствующих режимов, но и длительность импульсов тока через отдельные элементы системы при работе ее вне граничных условий.

Угол продолжительности включения шунтирующего вентиля в режиме прерывистых токов, когда $\lambda < \lambda_{гр1}$, найдется для данной продолжительности включения силовых вентилях λ из условия

$$j_{II} = 0 \text{ при } \vartheta = \lambda_{II}, \quad (24)$$

откуда после подстановки в (19) получим

$$0 = \left\{ \cos \Theta \sin (\vartheta_{в} - \Theta + \lambda) + \right. \\ \left. + [\varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_{в} - \Theta)] e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \right\} e^{-\lambda_{II} \operatorname{ctg} \Theta} - \varepsilon \quad (25)$$

или

$$\lambda_{II} = \operatorname{tg} \Theta \ln \frac{1}{\varepsilon} \left\{ \cos \Theta \sin (\vartheta_{в} - \Theta + \lambda) + \right. \\ \left. + [\varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_{в} - \Theta)] e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \right\}. \quad (25a)$$

В тех случаях, когда $\lambda > \lambda_{гр1}$, мы переходим к случаю 2 режима прерывистых токов, если $\vartheta_{в} < \operatorname{arc} \sin \varepsilon$; или к режиму непрерывных токов, если $\vartheta_{в} \geq \operatorname{arc} \sin \varepsilon$.

2. Ток нагрузки уменьшается до нуля при работе силовых вентилях в области углов $\vartheta < \operatorname{arc} \sin \varepsilon$.

Этот режим (рис. 3б) имеет место, если сигнал на включение очередного силового вентиля приходит, когда угловая координата напряжения соответствует неравенству (16). При этом вентиль включается и проводит ток за счет э. д. с. самоиндукции индуктивности нагрузки. Если величина энергии, запасенной в индуктивности, мала, то ток, протекающий через вентиль, может упасть до нуля раньше, чем выполнится условие его устойчивой работы — $\vartheta \geq \operatorname{arc} \sin \varepsilon$. После такого естественного выключения вентиля в случае сохранения на его управляющих элементах включающего сигнала, прибор включится в работу вновь, когда угловая координата станет равной $\vartheta = \vartheta_{в2} = \operatorname{arc} \sin \varepsilon$. При повторном включении вентиля его ток начнет возрастать с нулевого значения.

Если же сигнал на включение вентилях приходит в моменты времени $\vartheta \geq \operatorname{arc} \sin \varepsilon$, рассматриваемый режим прерывистых токов не может иметь место.

Таким образом, ток силового вентиля в данном режиме за время включения состоит из двух импульсов, первый из которых, начинаясь с некоторого значения, постепенно уменьшается до нуля, и второй возрастает с нулевого значения до некоторой величины, при которой вентиль искусственно выключается.

Данный режим прерывистых токов существует при значениях углов продолжительности включения силовых вентилях, удовлетворяющих следующему неравенству

$$\lambda_{гр} > \lambda > \lambda_{гр1} \quad (26)$$

Из неравенства (26) следует, что с одной стороны рассматриваемый режим прерывистых токов ограничивает область непрерывных токов нагрузки, а с другой стороны — область токов, спадающих до нуля при паузе. Кроме того, следует проверять потенциальную возможность существования разбираемого режима по условию (16).

Математически ток нагрузки в данном режиме с учетом системы уравнений (7) будет описываться следующими выражениями

$$j_{II} = [\cos \Theta \sin (\vartheta_{в1} - \Theta + \vartheta) - \varepsilon] + \\ + [\varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_{в1} - \Theta) + j_{он1}] e^{-\vartheta \operatorname{ctg} \Theta}, \quad (27)$$

$$j_{и2} = [\cos \Theta \sin (\vartheta_{в2} - \Theta + \vartheta) - \varepsilon] + \\ + [\varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_{в2} - \Theta)] e^{-\vartheta \operatorname{ctg} \Theta}, \quad (28)$$

$$j_{п} = (\varepsilon + j_{оп}) e^{-\vartheta \operatorname{ctg} \Theta} - \varepsilon, \quad (29)$$

где $\vartheta_{в1}$ и $\vartheta_{в2}$ — угловые координаты, соответствующие моменту первого и второго включений силовых вентиляей.

Начальные значения токов паузы и первого импульса тока через силовой вентиль найдутся из условий

$$j_{оп} = j_{и2} \quad \text{при} \quad \vartheta = \lambda_{и2}, \quad (30)$$

$$j_{он1} = j_{п} \quad \text{при} \quad \vartheta = \lambda_{п} = \frac{2\pi}{m} - \lambda_{и2} - (\vartheta_{в2} - \vartheta_{в1}), \quad (31)$$

где $\lambda_{и2}$ — продолжительность второго включения силового вентиля.

Подставив условия (30) — (31) в выражения (27) — (29), получим следующие уравнения для определения начальных значений токов нагрузки в различные моменты времени

$$j_{оп} = [\cos \Theta \sin (\vartheta_{в2} - \Theta + \lambda_{и2}) - \varepsilon] + \\ + [\varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_{в2} - \Theta)] e^{-\lambda_{и2} \operatorname{ctg} \Theta}, \quad (32)$$

$$j_{он1} = j_{о1} \{ \cos \Theta \sin (\vartheta_{в2} - \Theta + \lambda_{и2}) + [\varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_{в2} - \Theta)] \times \\ \times e^{-\lambda_{и2} \operatorname{ctg} \Theta} \} e^{-\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda_{и2} - \vartheta_{в2} + \vartheta_{в1} \right) \operatorname{ctg} \Theta} - \varepsilon \quad (33)$$

В расчетах рассматриваемого режима прерывистого тока в качестве независимой переменной удобнее всего использовать время второго включения силовых вентиляей. При этом неизвестной угловой координатой этих граничных режимов оказывается продолжительность первого включения силового вентиля, которую можно найти из условия

$$j_{и1} = 0 \quad \text{при} \quad \vartheta = \lambda_{и1}. \quad (34)$$

После подстановки условия (34) в уравнение (27) получим выражение, из которого можно найти неизвестную угловую величину

$$0 = [\cos \Theta \sin (\vartheta_{в1} - \Theta + \lambda_{и1}) - \varepsilon] + \\ + [\varepsilon - \cos \Theta \sin (\vartheta_{в1} - \Theta) + j_{он1}] e^{-\lambda_{и1} \operatorname{ctg} \Theta} \quad (35)$$

Выражение (35) является трансцендентным и разрешимо лишь численными и графическими методами.

Определив границы существования токовых режимов нагрузки и продолжительность работы отдельных вентиляей в каждом из них, перейдем к определению действующего и среднего значения токов в элементах схемы.

Средние и действующие значения тока нагрузки в относительных единицах для любого из рассмотренных режимов найдутся как

$$j_{ср} = \frac{m}{2\pi} \left[\int_0^{\lambda} j_{и}(\vartheta) d\vartheta + \int_0^{\lambda_{п}} j_{п}(\vartheta) d\vartheta \right], \quad (36)$$

$$j_d = \sqrt{\frac{m}{2\pi} \left[\int_0^{\lambda} j_n^2(\vartheta) d\vartheta + \int_0^{\lambda_n} j_n^2(\vartheta) d\vartheta \right]} \quad (37)$$

Нужно иметь в виду, что в зависимости от характера тока нагрузки в выражения (36) — (37) следует подставлять соответствующие подинтегральные функции и пределы интегрирования.

Интегралы в квадратных скобках зависимостей (36) — (37) представляют собой средние и квадратичные площади импульсов тока через соответствующие вентили системы, откуда могут быть найдены непосредственно и токи.

При исследовании выпрямительных схем оказывается необходимым знать спектральный состав импульсов тока, проходящего через силовые вентили мутатора. Выражение для тока силовых вентилях (7) можно представить в виде следующего ряда Фурье [2].

$$j_n = j_{\text{иср}} + \sum_{k=1}^{\infty} j_{kn} \sin(k\vartheta + \psi_k) = j_{\text{иср}} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin k\vartheta + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos k\vartheta, \quad (38)$$

где $j_{\text{иср}}$ — среднее значение тока силовых вентилях системы за период питающего напряжения;

$$j_{kn} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (39)$$

— амплитуда K -ой гармоники импульса тока;

$$\psi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k} \quad (40)$$

— фаза K -ой гармоники.

Фаза K -ой гармоники относительно напряжения сети переменного тока найдется как

$$\varphi_k = -\arctg \frac{b_k}{a_k} + \vartheta_v \quad (41)$$

Коэффициенты ряда Фурье a_k и b_k найдутся с помощью интегралов

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} j_n(\vartheta) \sin k\vartheta d\vartheta, \quad (42)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} j_n(\vartheta) \cos k\vartheta d\vartheta \quad (43)$$

Если ток силового вентиля за период состоит из двух импульсов (2-й случай режима прерывистых токов), то коэффициенты ряда Фурье определяются с помощью следующих интегралов:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\lambda_{n1}} j_{n1}(\vartheta) \sin k\vartheta d\vartheta + \int_0^{\lambda_{n2}} j_{n2}(\vartheta) \sin k(\vartheta + \vartheta_{v2} - \vartheta_{v1}) d\vartheta \right], \quad (44)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\lambda_{n1}} j_{n1}(\vartheta) \cos k\vartheta d\vartheta + \int_0^{\lambda_{n2}} j_{n2}(\vartheta) \cos k(\vartheta + \vartheta_{v2} - \vartheta_{v1}) d\vartheta \right], \quad (45)$$

где λ_{n1} и λ_{n2} — продолжительность первого и второго включений силовых вентилях в режиме прерывистых токов;

$\vartheta_{в1}$ и $\vartheta_{в2}$ — угловые координаты включений силовых вентилях;

$\vartheta_{в2} - \vartheta_{в1}$ — фаза второго импульса тока вентиля относительно первого импульса.

С помощью выражений (36) — (45) после интегрирования и преобразований можно получить для любого из рассмотренных режимов работы мутатора величины соответствующих токов в относительных единицах, которые протекают в различных элементах системы, а также их гармонический состав. Расчетные формулы будут представлять собой функции искомых величин от углов включения и продолжительности включения, в которых характеристики нагрузки ($\lg \Theta$ и ϵ) можно считать параметрами. Итогом таких вычислений будет выбор элементов преобразователя и расчет его характеристик. Здесь следует заметить, что возможность полного управления вентилями мутатора (независимо от способа управления) дает некоторую область углов включения и продолжительности включения, обеспечивающих для данных параметров нагрузки постоянство среднего тока. То есть можно, придерживаясь определенного закона управления вентилями, получить наиболее желаемые в каждом конкретном случае энергетические показатели установки.

Исходя из вышеизложенного, можно предложить следующий порядок расчета статических режимов рассматриваемых мутаторов на полностью управляемых элементах.

1. Определяется параметр нагрузки $\lg \Theta$ и задается определенный закон изменения углов включения, обеспечивающий требуемые энергетические показатели системы.

2. Задается величина э. д. с. в цепи постоянного тока мутатора, то есть величина ϵ .

3. Для данных $\lg \Theta$ и ϵ , учитывая закон управления углами включения, находятся с помощью выражений (14) — (15), (22) — (23), границы различных токовых режимов преобразователя.

4. Для ряда углов продолжительности включения силовых вентилях, начиная с нулевого значения, находятся нужные токи и их спектральный состав. При этом для каждой продолжительности включения следует проверять режим работы мутатора с тем, чтобы в дальнейшем оперировать соответствующими выражениями. В результате такого расчета получатся статические характеристики данного преобразователя с нагрузкой, имеющей определенный $\lg \Theta$ и э. д. с. постоянного тока.

5. Изменяется величина э. д. с. постоянного тока (ϵ), и расчет повторяется, начиная с П. 3.

Расхождения расчетных результатов по предлагаемой методике с практикой могут возникнуть, в основном, вследствие пренебрежения активным и реактивным сопротивлениями сети переменного тока, а также величиной энергии, отдаваемой в нагрузку схемой искусственной коммутации, если последняя применяется для выключения вентилях.

Таким образом изложенный метод будет давать малую ошибку в случае питания мутатора от достаточно мощной сети переменного тока. А пренебрежение энергией узла искусственной коммутации оправдано при использовании в исследуемой системе тиристоров, обладающих малым временем восстановления управляющих свойств; ошибка здесь возникает лишь при нагрузке, близкой к режиму холостого хода преобразователя из-за соизмеримости энергий, поступающих в нагрузку из сети и системы искусственной коммутации. Правда, в не-

которых схемах искусственной коммутации этот эффект может отсутствовать.

Экспериментальные исследования, проведенные на установке с кремниевыми управляемыми вентилями, показали, что опытные данные имеют хорошее совпадение с теоретическими результатами.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Каганов. «Электронные и ионные преобразователи», Госэнергоиздат, 1956.
2. А. А. Булгаков. «Основы динамики управляемых вентильных систем». Издательство АН СССР, 1963.
3. А. И. Зайцев, В. Н. Мишин, А. А. Кувшинов. «Импульсное регулирование скорости в приводах по системе УДП-Д с искусственной коммутацией». Доклады к четвертому Всесоюзному совещанию по автоматизированному электроприводу (сб. «Общие вопросы электропривода»), ВНИИЭМ, ОНТИ, М., 1964.
4. Кремниевые управляемые вентили, — «тиристоры», пер. с англ., изд. Энергия, 1964.