

РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

А. Д. МИТАЕНКО

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ при ТПИ)

В электропоездах постоянного тока, на морских и речных судах, на летательных аппаратах, а также в передвижных электрических станциях широко применяются электромашинные преобразовательные агрегаты, служащие для питания потребителей переменного тока. Такие преобразовательные агрегаты обычно содержат трехфазный синхронный генератор и приводной двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Частота выходного напряжения синхронного генератора обычно принимается 50 или 400 *герц*.

Условия работы таких преобразователей могут быть достаточно тяжелыми. Особенно это относится к электропоездам, где преобразовательный агрегат работает в условиях постоянной тряски и вибраций, широкого диапазона температур от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$, резких колебаний напряжения контактной сети и нагрузки. Приводной двигатель синхронного генератора на электропоездах обычно высоковольтный и получает питание непосредственно от контактной сети. Нагрузкой синхронного генератора могут быть асинхронные двигатели воздушных компрессоров и вентиляторов, цепи управления и освещения, цепи заряда аккумуляторных батарей, цепи питания элементов системы автоматического регулирования. При этом нагрузка может быть несимметричной и различного характера.

Во время работы синхронного генератора, частота его выходного напряжения может в значительной мере изменяться в основном при колебаниях напряжения питания приводного двигателя и изменении нагрузки генератора от холостого хода до номинальной. Изменение частоты выходного напряжения вредно сказывается на работе потребителей. В частности, резко изменяется режим работы асинхронных двигателей, сопровождающийся изменением скорости вращения, момента двигателя и коэффициента мощности. Колебания частоты напряжения сказываются и на работе магнитных элементов автоматики. Практика работы показывает, что уменьшение частоты напряжения приводит к заметному росту потребления реактивной мощности [1]; так при уменьшении частоты только на 1% реактивная мощность асинхронного двигателя и трансформатора увеличивается на 2%.

Из вышеотмеченного вытекает необходимость стабилизации частоты выходного напряжения электромашинных преобразовательных агрегатов. При этом возникают трудности конструирования датчика частоты, являющегося необходимым элементом системы автоматического регулирования. Существует несколько методов измерения частоты [2].

1. Методы, использующие пассивные настраиваемые системы [3]. Элементами подобных систем являются индуктивности, емкости и их комбинации. Наиболее известны конструкции датчиков, использующие резонанс

нансные L-C-контуры. Принципиальная схема и характеристика такого датчика приведены на рис. 1.

Выходной величиной таких датчиков является ток, поэтому в качестве усилителя мощности используются обычно магнитные усилители. Использование тиристорных усилителей затруднено. Абсолютная величина тока I определяется активным и реактивным сопротивлением контура. Рабочая точка по условиям чувствительности и работоспособности удалена от ре-

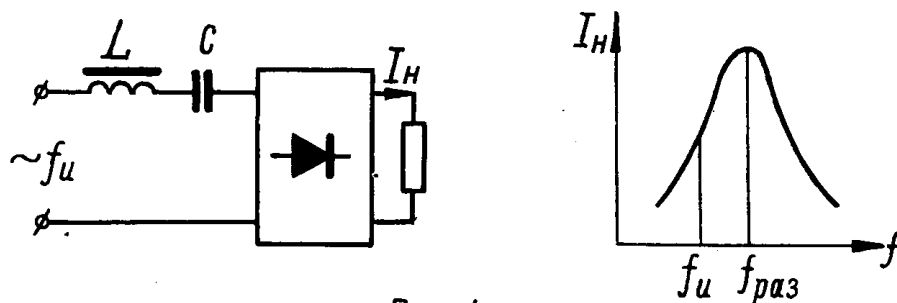


Рис. 1

зонанса, что вызывает увеличение реактивного сопротивления контура и ограничивает выходную мощность. Точность таких схем не превышает 2%, а в процессе работы требуется подстройка контура. Несколько лучшие характеристики имеют мостовые фазочувствительные схемы, но они более сложны. Кроме того, рассмотренные схемы при наличии высших гармонических в напряжении работают нечетко.

2. Метод заряда — разряда емкости основан на контроле отклонения напряжения на емкости с изменением частоты от напряжения при номинальной частоте. Этот метод прост, но не обеспечивает высокой точности. Для стабильной работы датчика необходима его термостабилизация.

3. Метод сравнения измеряемой частоты и эталонной. Этот метод дает высокую точность измерения, но нужна громоздкая аппаратура, непригодная для работы в нестационарных установках. При этом также затруднена автоматизация процесса измерения и контроля.

4. Дискретные методы измерения частоты [2,4]. Можно выделить два способа измерения частоты. Первый основан на подсчете числа периодов измеряемого сигнала за некоторый фиксированный, эталонный отрезок времени. Но при измерении низкой частоты интервал эталонного времени становится недопустимо большим с точки зрения быстродействия датчика и обеспечения высокой точности.

Второй способ основан на подсчете числа периодов эталонной частоты за один или несколько периодов измеряемой частоты.

Дискретные методы обеспечивают высокую точность измерения порядка $\pm 0,1$, но аппаратура при этом слишком усложнена, что сказывается на надежности системы регулирования. Это обстоятельство ограничивает область применения дискретных методов измерения частоты. Эти методы пригодны для контроля и в меньшей мере для целей регулирования частоты напряжения электрических машин.

5. Для измерения и регулирования частоты могут быть успешно применены электронные методы измерения малых интервалов времени. Использование этого метода дает возможность применять для регулирования частоты силовые тиристорные усилители, практическая безынерционность которых является одним из важнейших условий получения высококачественных переходных процессов.

Для регулирования и стабилизации частоты выходного напряжения электрических машин не обязательно знать значение частоты, можно измерять и регулировать длительность периода синусоидального напряжения или измерять только часть этого периода.

Ниже приводится способ контроля частоты напряжения синхронного генератора, основанный на измерении части периода выходного напряжения. Этот способ используется в системе автоматического регулирования частоты напряжения синхронного генератора. Сущность способа поясняется с помощью рис. 2.

Период напряжения T разбивается на два интервала: постоянной, не зависящей от периода T длительности t_0 и изменяющегося с изменением периода T (частоты) интервала $t_1 = f(T)$. На первом интервале t_0 с помощью интегрирующего устройства формируется линейно-изменяющееся напряжение U_2 . При достижении напряжением U_2 определенного постоянного уровня происходит отключение интегрирующего устройства и одновременное включение второго интегратора, где формируется линейная часть напряжения U_6 , амплитуда которого пропорциональна интервалу времени t_1 , т. е. зависит от частоты (периода) переменного напряжения. В конце периода T производится отключение второго интегратора. В отличие от первого интегратора спадание напряжения U_6 происходит не мгновенно, а с некоторой постоянной времени. Момент сравнения спадающей части напряжения U_6 с эталонным уровнем U_9 фиксируется и используется для управления усилителем мощности. При увеличении периода T фиксируемый момент сдвигается вправо, при уменьшении — влево.

Так как частота напряжения синхронного генератора однозначно определяется скоростью вращения приводного двигателя $\omega = \frac{2\pi f}{p}$, где p — число пар полюсов статорной обмотки генератора, то регулирование частоты может быть осуществлено только за счет регулирования скорости приводного двигателя постоянного тока. В рассматриваемом случае регулирование скорости приводного двигателя осуществляется по цепи обмотки возбуждения. Этот способ более прост, так как регулирование осуществляется в цепи с малой мощностью и особенно удобен для регулирования высоковольтных двигателей. Питание обмотки возбуждения можно осуществить или от управляемого трехфазного выпрямителя, или от тиристорного усилителя постоянного тока, питаемого выпрямленным напряжением и работающего в режиме ключа. В первом случае напряжение на обмотке возбуждения U_B изменяется в зависимости от угла регулирования вентилей моста и определяется выражением:

$$U_B = U_{B0} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

где U_{B0} — максимальное выпрямленное напряжение при угле регулирования $\alpha = 0$.

При питании обмотки возбуждения от тиристорного ключа напряжение на обмотке возбуждения определяется относительной продолжительностью включенного состояния регулирующего тиристора

$$U_B = U_n \cdot \frac{t_B}{T},$$

где U_n — постоянное напряжение на входе тиристорного ключа;
 t_B — время включенного состояния регулирующего тиристора;
 T — Период напряжения синхронного генератора.

Момент включения вентилей моста (или угол регулирования α) при питании обмотки возбуждения от управляемого выпрямителя, а также момент включения регулирующего тиристора при питании обмотки возбуждения от тиристорного ключа изменяются в зависимости от частоты напряжения генератора и определяются моментом сравнения спадающей части напряжения U_6 с эталонным напряжением U_9 (рис. 2). Выключение регулирующего тиристора производится в конце каждого периода напряжения генератора.

Стабилизация частоты напряжения генератора осуществляется следующим образом. При уменьшении (увеличении) частоты увеличивается (умень-

шается) период T напряжения генератора, а момент сравнения напряжений U_6 и U_9 смещается вправо (влево), что равносильно увеличению (уменьшению) угла регулирования α или уменьшению (увеличению) времени включенного состояния регулирующего тиристора. При этом напряжение на обмотке возбуждения уменьшается (увеличивается), а скорость приводного двигателя и частота синхронного генератора возрастают (уменьшаются).

На рис. 3, а приведена блок-схема измерительного органа частоты, а на рис. 3, б — его принципиальная электрическая схема. Работа измерительного органа поясняется временными диаграммами, приведенными на рис. 2.

Напряжение $U_{сг}$ синхронного генератора через понижающий трансформатор 1 и диод 2 преобразуется в однополярные прямоугольные импульсы U_1 , длительность которых равна половине периода T . Это преобразование выполняет формирователь Φ (транзисторы 3 и 4). Продифференцированный задний фронт импульсов напряжения U_1 опрокидывает статический триггер Tr в одно из устойчивых состояний. Левое плечо триггера (транзистор 11) управляет работой первого интегратора I_1 (конденсатор 7),

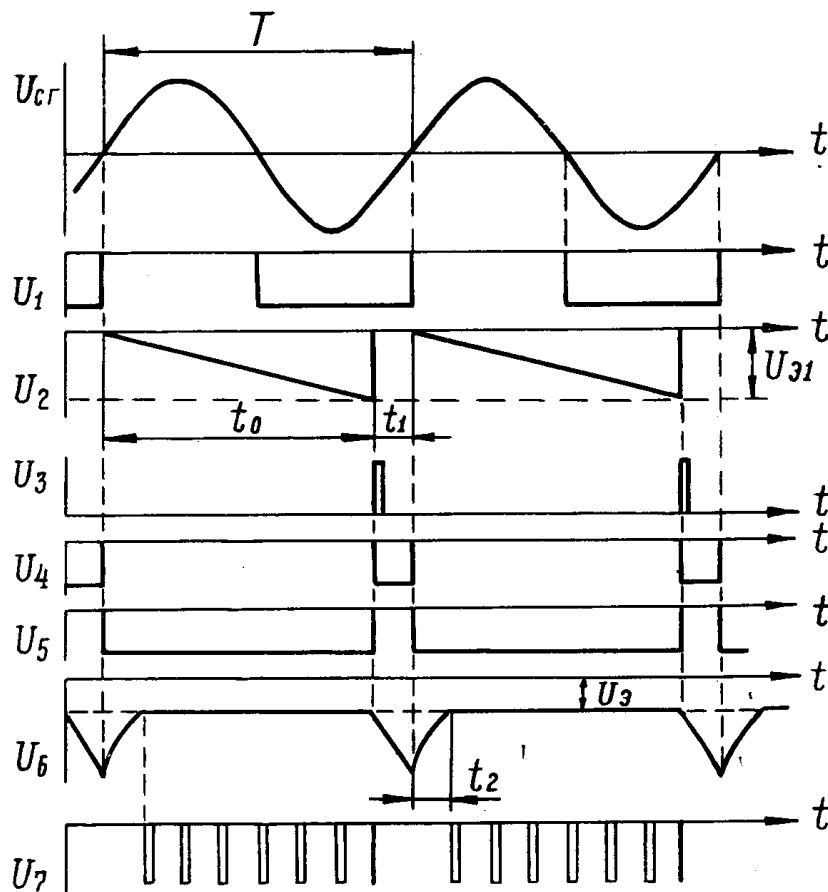


Рис. 2.

правое же плечо триггера (транзистор 12) управляет работой интегратора I_2 (конденсатор 18). При отсутствии на коллекторе транзистора 11 отрицательного потенциала U_4 транзистор 8 закрыт и конденсатор 7 заряжается в течение времени t_0 через сопротивление 5 от стабилизированного источника — E . При заданных параметрах интегратора I_1 длительность t_0 постоянна, не зависит от периода T напряжения $U_{ог}$ и определяется только величиной эталонного напряжения $U_{э1}$, устанавливаемого потенциометром 6. В момент сравнения напряжений U_2 и $U_{э1}$ на компараторе K_1 (тран-

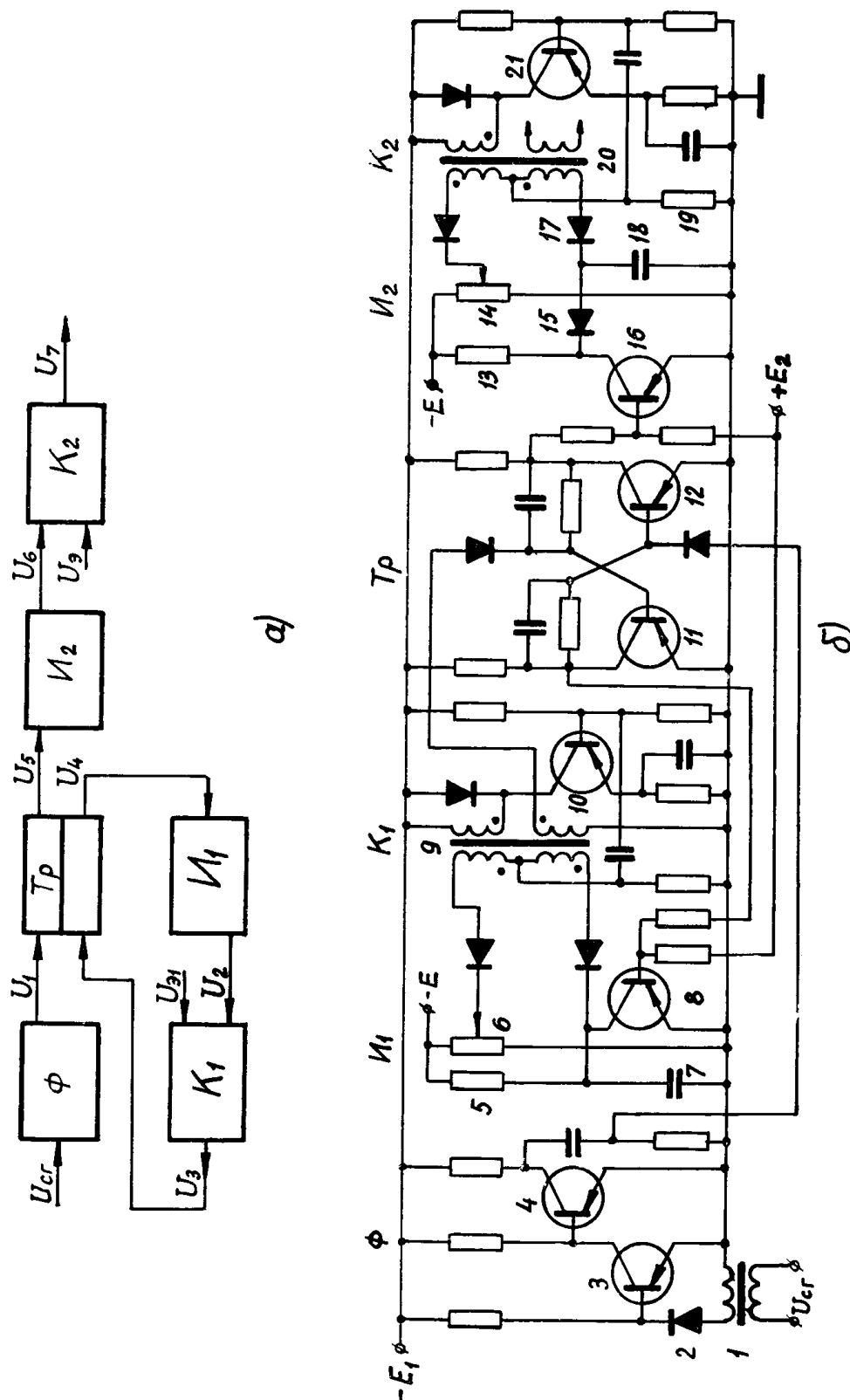


Рис. 3.

зистор 10 и импульсный трансформатор 9) на выходной обмотке импульсного трансформатора формируется импульс U_3 , опрокидывающий триггер во второе устойчивое состояние. Транзистор 11 закрывается, и отрицательный потенциал U_4 на его коллекторе открывает разрядный транзистор 8. Конденсатор 7 практически мгновенно разряжается. Одновременно закрывается транзистор 16 интегратора I_2 , и начинается заряд конденсатора 18 от источника E через сопротивление 13 и диод 15. Амплитуда U_b напряже-

ния на конденсаторе 18 зависит от периода T и определяется отрезком времени t_1 . В конце периода T триггер Tr опрокидывается в исходное состояние, одновременно начинается заряд конденсатора 7, открывается транзистор 16, и конденсатор 18 разряжается с некоторой постоянной времени через диод 17 и сопротивление 19. Момент сравнения напряжений U_6 и эталонного U_9 , устанавливаемого потенциометром 14, фиксируется компаратором K_2 (транзистор 21 и импульсный трансформатор 20), импульсы U_7 которого с выходной обмотки поступают на открытие регулирующего тиристора в цепи обмотки возбуждения приводного двигателя синхронного генератора. Далее процессы в измерительном органе частоты повторяются.

Для определения статических характеристик измерительного органа частоты рассмотрим процессы, происходящие при работе второго интегратора. При выводе основных уравнений приняты следующие допущения:

- 1) полупроводниковые диоды идеальны;
- 2) разрядный транзистор 16 рассматривается как идеальный ключ;
- 3) сопротивлением обмотки импульсного трансформатора пренебрегаем.

Эквивалентная схема представлена на рис. 4.

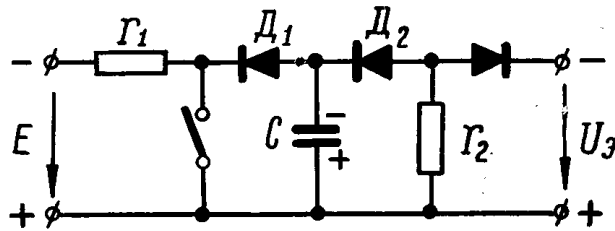


Рис. 4.

Здесь обозначены (см. рис. 3, б):

r_1, r_2 — соответственно резисторы 13 и 19,

d_1, d_2 — соответственно диоды 15 и 17,

C — конденсатор 18.

Транзистор 16 представлен ключом.

В течение отрезка времени t_1 ключ разомкнут и конденсатор заряжается с постоянной времени

$$\tau_1 = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \cdot C.$$

С учетом начального условия для квазиустановившегося процесса $U_c(0) = U_9$ через время t_1 напряжение на конденсаторе будет определяться выражением

$$U_c(t_1) = \beta E \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right) \right] + U_9 \cdot \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_1}\right),$$

где $\beta = \frac{r_2}{r_1 + r_2}$.

В течение времени t_0 ключ замкнут, а конденсатор разряжается через резистор r_2 с постоянной времени $\tau_2 = r_2 \cdot C$. Разряд конденсатора прекращается при достижении напряжения на конденсаторе величины U_9 , так как затем блокируется диодом D_2 . Время t_2 разряда определится из условия:

$$U_c \cdot \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_2}\right) = U_9. \quad (2)$$

Учитывая (1) и представляя экспоненциальную функцию рядом Тэйлора, из выражения (2) определим t_2 :

$$t_2 = \frac{\tau_2}{\tau_2 + t_1} \left(\frac{\beta E}{U_9} - 1 \right) \cdot t_1. \quad (3)$$

В приращениях равенство (3) будет иметь вид:

$$\Delta t_2 = \frac{\tau_2 \cdot \tau_1}{(\tau_1 + t_1)^2} \cdot \left(\frac{\beta E}{U_a} - 1 \right) \cdot \Delta t_1. \quad (4)$$

Коэффициент, стоящий в правой части (4), характеризует коэффициент усиления измерительного органа и его чувствительность. Увеличение коэффициента усиления и точности регулирования с учетом сохранения зоны регулирования достигается: 1) уменьшением длительности отрезка времени t_1 и величины эталонного напряжения U_a ;

2) увеличением зарядного тока конденсатора $i_a = \frac{E}{r_1}$ и разрядного сопротивления r_2 .

В опытной установке величина напряжений была принята: $U_a = 1,5$ в, $E = 40$, в. Точность поддержания частоты при этом была порядка 1%.

Предложенный способ регулирования частоты прост в реализации и может быть использован в системах автоматического регулирования электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Литвак. Рациональная компенсация реактивных нагрузок. Госэнергоиздат. 1963.
 2. А. С. Касаткин. Автоматическая обработка сигналов частотных датчиков. «Энергия». 1966.
 3. В. Л. Бунаков и Р. Г. Гаспаров. Полупроводниковые регуляторы напряжения и частоты. «Энергия». 1966.
 4. Г. З. Богород и В. А. Киблицкий. Цифровые регуляторы и измерители скорости. «Энергия». 1966.
-