ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО Том 97 ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА 1959 г.

О СХЕМЕ ТРЕХФАЗНОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Я. В. ПЕТРОВ, А. И. ЗАЙЦЕВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

В ряде отраслей промышленности находят применение трехфазные асинхронные двигатели небольшой мощности, питающиеся током частоты 100 -- 200 *пер/сек*, который получают обычно от электромашинного генератора или преобразователя частоты. В качестве источника тока 150 *пер/сек* для указанной цели представляет интерес также ферромагнитный утроитель частоты, имеющий следующие преимущества по сравнению с электромашинным преобразователем (генератором) частоты:

1) простота и малая стоимость конструкции;

2) надежность в работе ввиду отсутствия вращающихся частей, минимальный уход в эксплуатации;

3) меньший вес, более высокий к.п.д. (0,8-0,9 против 0,6-0,75).

В то же время ферромагнитному утроителю присущи крупные недостатки, препятствующие его практическому применению:

1) громоздкость установки при получении трехфазного тока утроенной частоты (3 *f*);

2) слишком мягкая внешняя характеристика $U_3 = f(I_3);$

3) низкий коэффициент мощности 0,2 ÷ 0,3;

4) значительный нагрев конструкции при работе, так как по экономическим соображениям выгодно принимать высокие значения индукции в стержнях магнитопровода $(1,8 \div 2,0 \text{ вс}/ M^2)$ и достаточно высокую плотность тока в обмотках.

Не останавливаясь на вопросе нагрева, который может быть разрешен удовлетворительно без снижения использования активных материалов при наличии теплостойкой изоляции обмоток типа кремнийорганической, наметим возможные пути устранения остальных недостатков утроителя. Ряд положений требует теоретической разработки и эксперимента, которые предполагается осуществить в ближайшее время.

Все известные схемы утроителей по роду намагничивающего тока можно разделить на две группы: однофазного и трехфазного тока. Утроители с трехфазным намагничивающим током выгоднее первых, так как имеют меньший удельный расход активных материалов, лучшую форму напряжений и токов 3 *f*, лучшие эксплуатационные характеристики, создают симметричную нагрузку на питающую сеть. Поэтому при выборе схемы трехфазного утроителя (т. е. утроителя, ге-

нерирующего трехфазную симметричную систему э.д.с. утроенной частоты) имеются ввиду лишь схемы с трехфазным намагничивающим TOKOM.

Однофазный ток утроенной частоты может быть получен с помощью трех однофазных трансформаторов, соединенных в трехфазную группу. одного трехфазного трансформатора с пространственным или плоским четырехстержневым сердечником или, наконец, одного трехфазного трансформатора с пятистержневым сердечником. Работами Е. А. Иванова и А. А. Котария [1, 2] установлено, что утроитель на базе пятистержневого магнитопровода по расходу активных материалов и форме э.д.с. частоты 3 f уступает первым двум утроителям. Получение практически синусоидальной э.д.с. 3 f требует усиления ярм пятистержневого трансформатора. Небольшая экономия на потерях в стали и расходе неактивных материалов перекрываются расходом трансформаторной стали. большим общим весом, большей сложностью изготовления и ремонта установки. Опытное исследование подобного утроителя на однофазный ток 3 f показывает, что из-за несимметрии магнитопровода в кривой напряжения 3 f действительно содержится основная гармоника напряжения, являющаяся причиной возникновения заметного противодействующего момента при определенных числах оборотов электродвигателя. Отмечалось также снижение напряжения утроенной частоты при пуске двигателя до 50 % от напряжения холостого хода утроителя; к. п. д. утроителя достигал 75 – 80 °/₀ [3].

Нами теоретически установлено, что если в утроителе с пространственным четырехстержневым симметричным магнитопроводом расположить вторичные обмотки на крайних стержнях, то такой утроитель по важнейшим показателям (удельный расход первичной мощности и активных материалов на единицу мощности утроенной частоты, к. п. д. и соя φ) практически равноценен утроителю из трех однофазных трансформаторов, уступая последнему в технологичности конструкции. При размещении вторичной обмотки на центральном стержне (или на четвертом стержне плоского магнитопровода, ярма которого для магнитной симметрии фаз должны быть усилены на 40-50 °/о) показатели утроителя значительно ухудшаются. В таблице 1 приведены данные опыта, подтверждающие неэффективность размещения вторичной обмотки на центральном (четвертом) стержне.

Таблица 1

$B_{1m}, \\ {\it Bc}/{\it M}^2$	$E_{30},$	Е ¹ 30, в	I_{3k}, a	$a^{I_{3k}}, a$	$\frac{P_{3m}}{P_{3m}^1}$	$\frac{x_{-3}^1}{x_3}$
1,61	127,5	118,8	3,55	2,94	1,29	1,12
1,71	140,2	129,8	4,72	3,72	1,37	1,17
1,81	153,6	139,2	6,45	4,67	1,52	1,25
1,91	164,0	147,4	9,36	6,18	1,69	1,36
20,1	174,0	154,6	12,44	7,7	1,82	1,44
21,1	186,0	162,0	15,25	9,0	1,95	1,48

Здесь B_{1m} — амплитуда индукции основной волны; E_{30}, I_{3k}, P_{3m} — соответственно э. д. с. холостого хода, ток короткого замыкания и максимальная активная мощность утроенной частоты; *x*₃ — индуктивное сопротивление вторичной обмотки.

Величины со знаком "прим" принадлежат утроителю с вторичной

обмоткой на четвертом стержне, без знака "прим" — утроителю с вторичными обмотками, размещенными совместно с первичными обмотками на трех стержнях. Таким образом, наиболее простым и экономичным утроителем на однофазный ток 3 f является утроитель из трех однофазных трансформаторов.

Трехфазный ток 3 f можно получить различными способами:

1) преобразовать однофазный ток 3 *f* в трехфазный с помощью фазопреобразователя;

2) получить двухфазный ток 3 f со сдвигом фаз 90° с помощью двух трехфазных групп однофазных трансформаторов, а затем, применив одну из известных схем, преобразовать двухфазный ток в трехфазный симметричный;

3) непосредственно в утроителе получить трехфазный ток 3 f с помощью трех трехфазных групп.

Преобразование однофазного тока в трехфазный может быть осуществлено статическим или машинным фазопреобразователем. Однако такое преобразование связано с большими затруднениями, поскольку неуравновешенная система превращается в систему уравновешенную: либо преобразование выполняется с низким к. п. д. — тогда симметрия трехфазной системы не нарушается при изменении нагрузки двигателя, либо преобразование совершается с достаточно высоким к. п. д, но трехфазная система остается симметричной лишь при определенной нагрузке двигателя. Последний недостаток устраняется, если применить регулируемые емкость и индуктивность, но это сникает к. п. д. фазообразователя и значительно усложняет общую схему утроителя. При машинном фазопреобразователе (например, трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором) к тому же теряется заманчивость ферромагнитного утроителя как статического устройства.

Следует признать неприемлемым также способ непосредственного получения трехфазного тока 3 *f* с помощью трех трехфазных групп однофазных трансформаторов, так как установка оказывается слишком громоздкой и тяжелой.

Останавливаемся на схеме получения двухфазного тока 3 f со сдвигом фаз 90° и последующим преобразованием этой системы токов в трехфазную симметричную систему токов 3 f достаточно просто (например, по схеме Скотта) и с высоким к. п. д. В известных схемах для получения трехфазного тока 3 f необходимо шесть однофазных трансформаторов и устройство для осуществления схемы Скотта—



два однофазных трансформатора или один автотрансформатор, рассчитанные на мощность 3 *f*. Чтобы уменьшить вес и габариты утроителя, увеличить к. п. д. фазопреобразователя и общий к. п. д. установки, предлагается схему Скотта осуществить без применения специальных трансформаторов или автотрансформаторов (рис. 1).

Первичные обмотки одной трехфазной группы соединены Y, другой — Z, отношение числа витков первичных обмоток W_1 : W'_1 : W''_1 =

=1:0,578:0,578. Благодаря этому векторы магнитных потоков основной гармоники фаз II группы отстают на 30° от соответствующих векто-

ров потоков I группы, что отвечает взаимному смещению векторов потоков третьей гармоники групп на 90° (рис. 2*a*). Например, для фаз А имеем

$$\Phi_{AI} = \Phi_1 \cos \omega t + \Phi_3 \cos 3 \omega t;$$

$$\Phi_{AII} = \Phi_{I} \cos (\omega t - 30^{\circ}) + \Phi_{3} \cos 3 (\omega t - 30^{\circ}) =$$

= $\Phi_{c} \cos (\omega t - 30^{\circ}) + \Phi_{3} \cos (3 \omega t - 90).$

На рис. 26 приведена потенциальная диаграмма, поясняющая принцип преобразования двухфазной системы э. д. с. 3 *f* со сдвигом фаз 90° в трехфазную симметричную систему э. д. с. той же частоты. Си-



Рис. 2.

нусондальность э. д. с. трехфазной системы обеспечивается в том случае, если сумма э. д. с. основной частоты на зажимах *ob* и *oc*, а также *oa* равна 0. Для этого необходимо вторичные обмотки одной группы разделить на две части и далее соединить части между собою и вторичные обмотки в целом известным образом. Отношение числа витков вторичных обмоток $W_2: W_2: W_2: W_2=0,865:0,5:0,5.$

Для нормальной работы двигателя, питающегося от утроителя. необходимо стабилизировать напряжение утроенной частоты. Стабилизатор не должен заметно снижать к. п. д. и сос у утроителя (желательно, наоборот, стабилизацию напряжения сочетать с повышением коэффициента мощности и использования материалов утроителя) и в то же время быть простым и надежным в эксплуатации, иметь небольшие габариты и вес, приемлемую инерционность и не искажать значительно напряжения и токи утроенной частоты. Всем этим требо-. ваниям в необходимой степени удовлетворяет стабилизирующее устройство, состоящее или только из конденсаторов (при последовательном соединении их с нагрузкой) или из конденсаторов и регулируемых дросселей (при параллельном соединении конденсаторов и нагрузки). На рис. З показаны возможные схемы стабилизации напряжения нагрузки: при последовательном (а) и параллельном (б) соединении конденсаторов и нагрузки, по схеме А. Д. Кратирова (в), предложенной для утроителя на однофазный ток 3 f [4].

В последнем случае на стержни трансформаторов каждой группы необходимо наложить дополнительные обмотки и регулируемый дроссель включить между нулевыми точками У этих обмоток и У конденсаторов. Принципиальной особенностью схемы А. Д. Кратирова является использование конденсаторов не только для стабилизации и увеличения выхода мощности утроенной частоты (это достигается и в двух других схемах), но также для частичной компенсации сдвига фаз между напряжением и током основной волны, так как через конденсаторы протекают токи нечетных гармоник, включая основную. Компенсирующий эффект конденсаторов для третьей гармоники тока может быть приравнен эффекту схемы при параллельном соединении конденсаторов и нагрузки.

В качестве регулируемой индуктивности в схемах (б) и (в) можно использовать небольшой дроссель насыщения, имеющий положи-





тельную обратную связь по току нагрузки 3 f. Выпрямление тока производится полупроводниковыми выпрямителями.

Установим сравнительную эффективность последовательного и параллельного включения конденсаторов для фазы утроителя при нагрузке активно-индуктивного характера. Как известно, статический утроитель можно представить приближенной схемой замещения в виде источника э. д. с. E_{30} с внутренним сопротивлением x_3 (активным сопротивлением обмоток пренебрегаем). При последовательном включении конденсатора получим выражение для внешней характеристики утроителя (рис. 4).

$$U_{H} = \sqrt{E_{30}^{2} - I_{H}^{2} \left[(x_{3} - x_{c})^{2} + 2 x_{H} (x_{3} - x_{c}) \right]}.$$
(1)



Рис. 4.

Полная мощность нагрузки

$$S_{H} = \frac{U_{H}^{2}}{Z_{H}} = \frac{E_{30}^{2} - I_{H}^{2}[(x_{3} - x_{c})^{2} + 2 x_{H} (x_{3} - x_{c})]}{V r_{H}^{2} + x_{H}^{2}}.$$
 (2)

26

Приравнивая производную $\frac{dS_{H}}{dx_{c}} = 0$; получим значение оптимального емкостного сопротивления, при котором величина S_{H} достигает максимума

$$x_{conm} = x_3 + x_H. \tag{3}$$

Максимальная мощность нагрузки, отдаваемая утроителем

$$S_{H,Makc} = \frac{E_{30}^2 \cdot Z_H}{r_H^2}$$
 (4)

Необходимая мощность конденсатора

$$Q_{c} = I_{c}^{2} \cdot x_{conm} = I_{\mu}^{2} \cdot x_{conm} = \frac{E_{30}^{2}(x_{3} + x_{\mu})}{r_{\mu}^{2}}, \qquad (5)$$

так как при максимальной мощности $I_{\mu} = \frac{E_{30}}{r_{\mu}}$.

Удельный выход мощности при оптимальном режиме

$$\frac{S_{H,Makc}}{Q_c} = \frac{Z_H}{x_3 + x_H} [k_B a | k_B a p] . \tag{6}$$

При параллельном включении конденсатора внешняя характеристика утроителя (рис. 5)

$$U_{H} = \frac{E_{30} \cdot Z_{H}}{\sqrt{Z_{H}^{2} + x_{3}^{2} \left[\left(\frac{x_{H}}{Z_{H}} - \frac{Z_{H}}{x_{c}} \right)^{2} + \left(\frac{r_{H}}{Z_{H}} \right)^{2} \right] + 2 Z_{H} x_{3} \left(\frac{x_{H}}{Z_{H}} - \frac{Z_{H}}{x_{c}} \right)}.$$
 (7)



Приравнивая производную $\frac{dS_{H}}{dx_{c}} = \frac{d}{dx_{c}} \left(\frac{U_{H}^{2}}{Z_{H}} \right) = 0$, получим зна-

чение оптимального емкостного сопротивления, при котором S_{μ} достигает максимума

$$x_{conm} = \frac{x_3 Z_{\mu}^2}{x_3 x_n + Z_{\mu}^2}.$$
(8)

Максимальная мощность нагрузки

$$S_{H,Makc} = \frac{E_{30}^2 \cdot Z_{H}^3}{r_{H}^2 \cdot x_{3}^2}.$$
 (9)

Необходимая мощность конденсатора

$$Q_{c} = \frac{U_{c}^{2}}{x_{conm}} = \frac{U_{H}^{2}}{x_{conm}} = \frac{E_{30}^{2} Z_{H}^{2} (x_{3} x_{H} + Z_{H}^{2})}{r_{H}^{2} x_{3}^{3}}, \qquad (10)$$

так как при максимальной мощности

$$U_{\scriptscriptstyle H} = \frac{E_{30} \cdot Z_{\scriptscriptstyle H}^2}{r_{\scriptscriptstyle H} \cdot x_3}$$

Удельный выход мощности при оптимальном режиме

$$\frac{S_{\text{HMakc}}}{Q_c} = \frac{x_3 Z_{\mu}}{x_3 x_{\mu} + Z_{\mu}^2}.$$
(11)

Разделив (11) на (6), устанавливаем эффективность параллельного мли последовательного включения конденсаторов при оптимальных режимах

$$\left(\frac{S_{\text{HMARC}}}{Q_c}\right)_{nap}: \left(\frac{S_{\text{HMARC}}}{Q_c}\right)_{noc} = \frac{x_3^2 + x_3 x_{\text{H}}}{x_3 x_{\text{H}} + Z_{\text{H}}^2}.$$
 (12)

Зависимость
$$\left(\frac{S_{HMakc}}{Q_c}\right)_{nap}$$
 : $\left(\frac{S_{HMakc}}{Q_c}\right)_{noc} = f\left(\frac{Z_{H}}{x_3}\right)$ представляет-

ся гиперболической кривой, причем при <u>Z_н</u>=1,0 отношение удель-



ных мощностей равно 1,0, то есть в этом случае оба способа присоединения конденсаторов оказываются равноценными (рис. 6). Последовательное включение конденсаторов более эффективно для утроителя с x₃ < Z_н, параллельное, наоборот, — для утроителя с $x_3 > Z_{\rm H}$. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании утроителя для заданной нагрузки Z_н, отвечающей режиму максимальной мощности.

> Сравним обе схемы присоединения конденсаторов при стабилизации напряжения, полагая $U_{\mu} = E_{30}$

при различных нагрузках.

Из выражения (1) при $U_{\kappa} = E_{30}$ получим два значения стабилизирующего емкостного сопротивления последовательно включенного конденсатора

$$x_{ccT\cdot 1} = x_3 + 2 x_{ii};$$

 $x_{ccT\cdot 2} = x_3.$ (13)

Для переменной нагрузки электродвигателя больший практический интерес имеет стабилизирующее сопротивление $x_{ccT+2} = x_3$, которое не зависит от нагрузки и позволяет автоматически поддерживать постоянное напряжение нагрузки независимо от ее величины и характера (см. рис. 4 б).

При стабилизированном напряжении мощность нагрузки

$$S_{H_{cT}} = \frac{U_{R}^{2}}{Z_{H}} = \frac{E_{30}^{2}}{Z_{H}}$$
 (14)-

Можно показать, что при отсутствии конденсатора в цепи утроителя максимальная мощность нагрузки составляет

$$S_{{}_{\!H},{}_{Makc}} = rac{E_{30}^2}{2\, \pmb{X_8}} \, \cdot$$

Таким образом, применяя конденсатор, удается не только поддерживать практически постоянное напряжение на изменяющейся нагрузке, но и выделять в ней мощность, которая превышает максимальную мощность при отсутствии конденсатора в $\frac{S_{H \cdot ct}}{S_{H \cdot Makc}} = \frac{2X_3}{Z_H}$ раз. Тем самым использование утроителя значительно повышается. Для последовательного конденсатора

$$Q_{c} = I_{c}^{2} \cdot x_{cct} = I_{H}^{2} \cdot x_{cct} = \frac{E_{30}^{2} \cdot x_{3}}{Z_{H}^{2}}, \qquad (15)$$

так как

x_{cct}

$$= x_3$$
и $I_n = \frac{E_{30}}{Z_H}$.

Удельный выход мощности в режиме стабилизации

$$\frac{S_{H\cdot ct}}{Q_c} = \frac{Z_H}{x_B}.$$
 (16)

Значения стабилизирующих емкостных сопротивлений при параллельно включенном конденсаторе получим из (7), считая $U_{\mu} = E_{30}$

$$x_{cct 1,2} = \frac{x_3 x_H + Z_{\rm H}^2 \pm \sqrt{Z_{\rm H}^4 - x_3^2 r_{\rm H}^2}}{x_3 + 2 x_H}$$
(17)

Принимаем перед корнем знак +, так как при этом обеспечивается меньшая мощность конденсатора. Здесь величина емкостного сопротивления зависит от сопротивления нагрузки, поэтому при колебаниях последней необходимо соответствующим образом изменять индуктивность дросселя, включаемого последовательно с конденсатором. В этом существенный недостаток данного способа стабилизации, увеличивающийся к тому же за счет дополнительных потерь мощности в регулируемом дросселе. Удельный выход мощности в режиме стабилизации при параллельном включении конденсатора

$$\frac{S_{\rm HCT}}{Q_c} = \frac{x_3 x_{\rm H} + Z_{\rm H}^2 + \sqrt{Z_{\rm H}^4 - x_3^3 r_{\rm H}^2}}{Z_{\rm H} (x_3 + 2 x_{\rm H})}.$$
(18)

Разделив (18) на (16), получим для режимов стабилизации напряжения

$$\left(\frac{S_{_{\mathrm{HCT}}}}{Q_c}\right)_{nap} : \left(\frac{S_{_{\mathrm{HCT}}}}{Q_c}\right)_{noc} = \frac{x_3(x_3x_{_{\mathrm{H}}} + Z_{_{\mathrm{H}}}^2 + \sqrt{Z_{_{\mathrm{H}}}^4 - x_3^2r_{_{\mathrm{H}}}^2}}{Z_{_{\mathrm{H}}}^2(x_3 + 2x_{_{\mathrm{H}}})}.$$
 (19)

Последняя зависимость описывается гиперболической кривой, подобной рис. 6, причем оба способа стабилизации напряжения эквивалентны по удельным затратам мощности конденсаторов при $\frac{Z_{\rm H}}{x_3} \leq 1,0$ для $\cos \varphi_{\rm H} = 0 \div 1,0$. Последовательное включение конденсатора более экономично, начиная с значений $\frac{Z_{\rm H}}{x_3}$, несколько меньших 1,0 или больших 1,0 (в зависимости от $\cos \varphi_{\rm H}$). Таким образом, диапазон нагрузок, для которых стабилизация напряжения параллельно включенным конденсатором экономичнее, оказывается более узким, чем при оптимальных режимах.

Практически возможно осуществить утроитель с таким индуктивным сопротивлением, чтобы последовательное включение конденсатора при данной максимальной нагрузке (минимальном сопротивлении Z_н) было более эффективным по расходу мощности стабилизирующего конденсатора на единицу мощности нагрузки. Выбор значений x_3 следует производить с учетом выражения (16). Стабилизация напряжения последовательно включенным конденсатором не требует применения вспомогательных регулируемых сопротивлений, которые заметно усложняют общую схему утроителя и вызывают дополнительные потери мощности, что понижает эксплуатационные показатели установки в целом. Таким образом приходим к заключению, что способ стабилизации напряжения нагрузки последовательно включенным конденсатором является наиболее простым и экономичным. В случае короткого замыкания фаз между двигателем и утроителем могут возникнуть значительные перенапряжения конденсаторов и обмоток утроителя изза резонанса напряжений частоты 3 f. С этим недостатком последова-- тельного включения конденсаторов при $x_{ccT} = x_3$ приходится считаться и создавать специальную защиту от перенапряжений.

Выводы

1. Наиболее приемлемой схемой для трехфазного утроителя следует считать вариант шести однофазных трансформаторов с последующим преобразованием двухфазного тока в трехфазный по схеме Скотта.

2. Для уменьшения веса и габаритов утроителя, увеличения к. п. д. установки рекомендуется преобразование двухфазного тока в трехфазный осуществить без применения добавочных трансформаторов — — на обмотках утроителя.

30

3. Стабилизацию напряжения утроенной частоты с одновременным повышением использования утроителя рационально выполнить применением конденсаторов, включаемых последовательно с нагоузкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. И ванов Е. А. Трехфазный силовой преобразователь частоты. Сборник трудов Ленинградского ордена Ленина института инженеров ж. д. транспорта, вып. 138, 1948.

2. Котария А. А. Статический электромагнитный утроитель частоты в одной

трансформаторной единице. Труды Грузинского политехнического института, № 29, 1953. 3. Dahlgren F. and Littke – Persson A. K. Static Freguency Transfor-mers for Small Electric Motors. Tekniska Högskolans Handlingar, Nr. 47, 1951, Göteborg, Sweden.

4. Кратиров А. Д. Преобразователь частоты. Описание изобретения № 73764, класс 21d², 51. 5. Нейман Л. Р. и Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехии-

ки, ч. II, Госэнергоиздат, 1954.