

**Петухов А.М., Кузьмин В.М., Дубровский И. Н.**  
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕЩЕННОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ

**Петухов А. М., Кузьмин В. М., Дубровский И. Н.**  
**A.M. Petukhov, V.M. Kuzmin , I.N. Dubrovskiy**

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОВМЕЩЕННОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАБИЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ**

**CALCULATION OF THE PARAMETERS OF A COMBINED POWER GENERATOR IN A SELF-CONTAINED AC POWER SUPPLY AT STABLE FREQUENCY**



**Петухов Анатолий Михайлович** – соискатель кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Anatoly M. Petukhov** – PhD Applicant, Department of Electro Mechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru



**Кузьмин Вячеслав Матвеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Vyacheslav M.Kuzmin** - Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Electro Mechanics, Komsomolsk-on-Amur Sate Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru



**Дубровский Игорь Николаевич** – кандидат технических наук, доцент военной кафедры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.

**Mr. Igor N. Dubrovsky** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Military Training Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрен расчет параметров совмещенного электромашинного генератора в автономном источнике электрического тока.

**Summary.** The paper presents the calculation of parameters of a combined power generator in a self-contained power supply.

**Ключевые слова:** автономное электропитание.

**Key words:** self-contained power supply.

УДК 621.311:621.314.5

В настоящее время автономные источники переменного тока стабильной частоты (АИПТСЧ) применяются в различных отраслях промышленности и народном хозяйстве. Некоторые технические решения таких источников являются довольно распространенными, но они, к сожалению, не в полной мере способны удовлетворить все возрастающие к ним эксплуатационные требования. Это обстоятельство стимулирует процесс разработки и внедре-

ния новых вариантов таких источников, который не обошел стороной и Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, где на кафедре «Электромеханика» исследуется в настоящее время одно из новых технических решений АИПТСЧ, краткий расчет некоторых параметров которого представлен ниже.

Автономный источник состоит из двух асинхронных машин (см. рис. 1), установленных на одном валу и расположенных в одном корпусе [1, 229]. Роторные обмотки машин подключены к роторной обмотке асинхронного возбудителя (АВ) таким образом, что одна из них работает в режиме электромагнитного тормоза (ЭМТ), а другая – в режиме асинхронного генератора (АГ). Статорная обмотка ЭМТ выполнена в виде обычной трехфазной обмотки. На статоре АГ расположено три идентичных трехфазных обмотки, уложенных в одни и те же пазы. Выводы выходной обмотки ЭМТ подключены к нулевым точкам статорных обмоток АГ. Статорная обмотка АВ, который установлен на одном валу с АГ и ЭМТ, подключена к нагрузке через фазосдвигающее устройство (ФСУ).

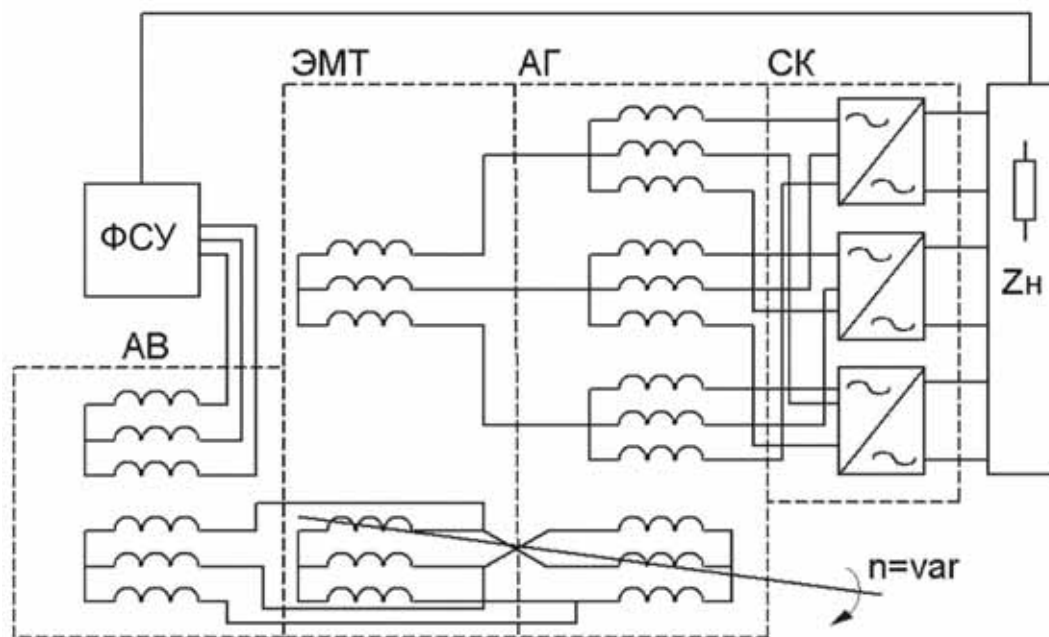


Рис. 1. Трехфазный автономный источник стабильной частоты на основе двух асинхронных машин с асинхронным возбудителем

Устройство работает следующим образом. При питании обмотки АВ от ФСУ переменным током стабильной частоты  $\omega_1$  и вращении вала с угловой частотой  $\omega$  в роторной обмотке возбудителя наводится ЭДС, изменяющаяся с угловой частотой

$$\omega_6 = \omega_1 - \omega p_1,$$

где  $p_1$  – число пар полюсов обмотки возбудителя.

Нагрузкой для роторной обмотки возбудителя являются роторные обмотки ЭМТ и АГ. В статорных обмотках этих машин наводятся ЭДС с угловыми частотами

$$\omega_2 = \omega (p_2 - p_1) + \omega_1, \quad \omega_3 = \omega (p_3 + p_1) - \omega_1,$$

где  $p_2$  и  $p_3$  – число пар полюсов ЭМТ и АГ соответственно.

Для получения напряжения стабильной частоты используем биения выходного напряжения электромашинного генератора при сложении ЭДС близких частот.

Частота биений определяется следующим образом:

$$\omega_b = \omega_2 - \omega_3 = \omega (2p_1 - p_2 + p_3) + 2\omega_1. \quad (1)$$

В этом выражении два слагаемых: одно зависит от частоты тока возбуждения, а другое – от частоты вращения вала. Так как нам необходимо, чтобы частота биений не зависела от частоты вращения вала, то должно выполняться условие  $\omega(2p_1 - p_2 + p_3) = 0$ , из которого получаем, что

$$2p_1 + p_3 = p_2. \quad (2)$$

Будем считать, что при равенстве амплитуд ЭДС ЭМТ и АГ для образования биений достаточным будет выполнение следующего соотношения:

$$\frac{\omega_3}{\omega_b} \geq 8,$$

тогда

$$\omega(p_3 + p_1) - \omega_1 \geq 8 \times 2\omega_1,$$

откуда найдем

$$\omega_{\min} = \frac{17\omega_1}{p_3 + p_1}, \quad (3)$$

где  $\omega_{\min}$  – минимальная частота вращения вала, при которой будут формироваться биения.

Таким образом, для того чтобы получить на выходе рассматриваемой системы напряжение стабильной частоты, необходимо выполнить условия:

$$\begin{cases} \omega \geq \left( \omega_{\min} = \frac{17\omega_1}{p_3 + p_1} \right); \\ 2p_1 + p_3 = p_2 \end{cases} \quad (4)$$

Для расчета образующихся гармонических составляющих необходимо определиться с количеством пазов на роторе и статоре, шагом обмоток, числом пазов на полюс и фазу.

Кроме того, будем рассматривать такие соотношения между количеством пазов и пар полюсов, чтобы число пазов на полюс и фазу  $q$  было целым числом – это необходимо как для удобства выполнения обмоток, так и для исключения возможности возникновения дополнительных гармонических составляющих.

Обмотки выполним трехфазными симметричными с фазной зоной  $\alpha = 60^\circ$ . Для определения возможных вариантов соотношения  $Z$ ,  $p$  и  $q$  рассмотрим обобщенное уравнение

$$q = \frac{Z}{6p}. \quad (5)$$

График зависимости  $q$  от  $p$  при некоторых фиксированных значениях  $Z$  представлен на рис. 2.

Из графиков видно, что для каждого фиксированного  $Z$  количество узловых точек (с целым  $q$  и  $p$  – выделены точками) ограничено и возрастает с ростом  $Z$  (для кратных  $Z$ ).

С учетом изложенного выше для АИПТСЧ малой и средней мощности при соблюдении условий (2) и (5) параметры  $Z$ ,  $q$ ,  $p$  представлены в табл. 1.

В табл. 1 приведены минимальные значения для количества пазов статора и ротора  $Z_{cmin}$  и  $Z_{pmin}$  соответственно при заданном количестве пар полюсов для каждой машины.

Для изготовления АИПТСЧ с необходимым соотношением пар полюсов может быть применена электрическая машина с количеством пазов  $Z_c$  и  $Z_p$ , вычисленными по формуле

$$Z = Z_{\min} + kp_2, \quad (6)$$

где  $k$  – целое число.

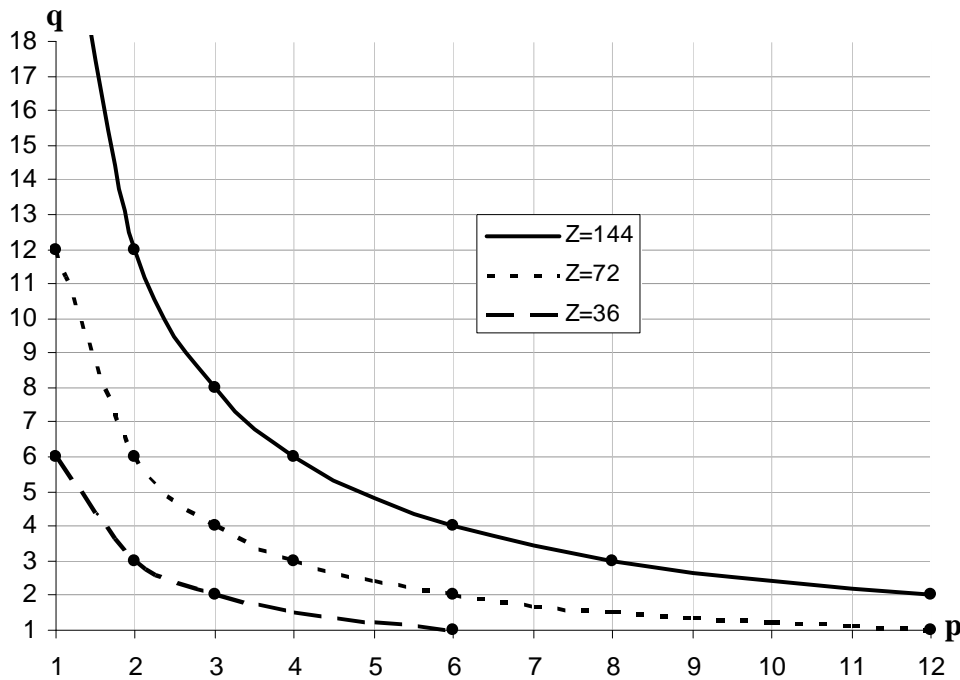


Рис. 2. Зависимость  $q$  от количества пар полюсов для фиксированного количества пазов  $Z$

Таблица 1

Параметры АИПТСЧ малой и средней мощности

Параметр	Значения параметров для возможных вариантов					
$p_1$	1	1	1	1	2	2
$p_2$	3	3	4	4	5	6
$p_3$	1	1	2	2	1	2
$Z_{cmin}$	72	108	96	144	120	144
$Z_{pmin}$	36	72	48	96	60	72
$q_{2C}$	4	6	4	6	4	4
$q_{2P}$	2	4	2	4	2	2
$q_{3C}$	12	18	8	12	20	12
$q_{3P}$	6	12	4	8	10	6

В связи с тем, что обмотки АГ и ЭМТ уложены в одном магнитопроводе, то для эффективной их совместной работы необходимо исключить взаимно-индуктивную связь между ними [2, 88].

Допустим, что обмотки выполнены трехфазными однослойными с диаметрными шагами  $y_3 = \tau_3 = 3\tau_2$  и  $y_2 = \tau_2$ , где  $\tau_3$  и  $\tau_2$  – полюсные деления полей  $\Phi_3$  ( $p_3 = 1$ ) и  $\Phi_2$  ( $p_2 = 3$ ).

Рассмотрим сначала условия работы обмотки 3 ( $2p_3 = 2$ ) в магнитном поле  $\Phi_2$  ( $2p_2 = 6$ ).

Электродвижущие силы, наводимые в катушечных группах обмотки 3 полями  $\Phi_3$  и  $\Phi_2$ , сдвинуты на углы:

$$\alpha_{33} = \frac{360}{3} p_3 = 120^\circ \text{ – в поле } \Phi_3; \quad \alpha_{32} = \frac{360}{3} p_2 = \alpha_{33} \frac{p_2}{p_3} = 360^\circ \text{ – в поле } \Phi_2.$$

Следовательно, ЭДС, наводимые в каждой фазе (катушечной группе) обмотки 3 полем  $\Phi_2$ , совпадают по фазе, а значения их зависят от шага обмотки 3 и ее расположения в поле  $\Phi_2$ :

$$E_{32} \sim K_{y32} K_{p32} \Phi_2,$$

где  $K_{y12}$  – коэффициент укорочения;  $K_{p12}$  – коэффициент распределения катушечной группы обмотки 1 в поле  $\Phi_2$ ;

$$K_{y32} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_3}{\tau_2}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_3}{\tau_3} \cdot 3\right), \quad K_{p32} = \frac{\sin\left(q_3 \cdot \frac{\alpha_{32}}{2}\right)}{q_3 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{32}}{2}\right)} = \frac{\sin\left(q_3 \cdot \frac{\alpha_{33}}{2} \cdot 3\right)}{q_3 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{33}}{2} \cdot 3\right)}.$$

При  $y_3 = \tau_3$  имеем

$$K_{y32} K_{p32} \neq 0, \quad E_{32} \neq 0,$$

т.е. однослойная обмотка 3 имеет индуктивную связь с полем  $\Phi_2$  и такую обмотку нельзя соединить в треугольник, так как в замкнутом контуре треугольника под действием ЭДС  $3E_{32}$  будут протекать паразитные токи и нормальная работа обмотки будет нарушена. При соединении такой обмотки в звезду (без вывода нулевой точки) вредное действие ЭДС  $E_{32}$  устраняется, так как на линейных выводах обмотки 3 ЭДС  $E_{32}$  геометрически вычитаются и дают нулевую сумму. Электродвижущую силу  $E_{32}$  можно устранить путем выполнения обмотки 3 двухслойной с укороченным на  $\tau_2$  шагом, т. е. с  $y_3 = \tau_3 - \tau_2 = 2/3\tau_3$ , тогда

$$K_{y32} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 3\right) = \sin(\pi) = 0, \quad E_{32} = 0,$$

Таким образом, двухслойная обмотка 3 с числом полюсов  $2p_3 = 2$  и шагом  $y_3 = 2/3\tau_3 = 2\tau_2$  индуктивно с полем  $\Phi_2$  обмотки 2 ( $2p_2 = 6$ ) не связана и ее можно соединять как звездой, так и треугольником. В такой обмотке можно выполнять одну или две параллельные ветви.

Теперь рассмотрим условия работы обмотки 2 ( $2p_2 = 6$ ) в магнитном поле  $\Phi_3$  ( $2p_3 = 2$ ). Электродвижущие силы, наводимые в катушечных группах однослойной обмотки 2 полями  $\Phi_3$  и  $\Phi_2$ , сдвинуты на углы:

$$\alpha_{22} = \frac{360}{9} p_2 = 120^\circ \text{ – в поле } \Phi_2; \quad \alpha_{23} = \frac{360}{9} p_3 = \alpha_{22} \frac{p_3}{p_2} = 40^\circ \text{ – в поле } \Phi_3.$$

Следовательно, ЭДС, наводимые в катушечных группах обмотки 2 полем  $\Phi_3$ :

$$E_{23} \sim K_{y23} K_{p23} \Phi_3 \neq 0,$$

$$K_{y23} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_2}{\tau_3}\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_2}{\tau_2} \cdot \frac{1}{3}\right) \neq 0, \quad K_{p23} = \frac{\sin\left(q_2 \cdot \frac{\alpha_{23}}{2}\right)}{q_2 \sin\left(\frac{\alpha_{23}}{2}\right)} = \frac{\sin\left(q_2 \cdot \frac{\alpha_{22}}{2} \cdot \frac{1}{3}\right)}{q_2 \sin\left(\frac{\alpha_{22}}{2} \cdot \frac{1}{3}\right)} \neq 0.$$

Таким образом, в каждой катушечной группе обмотки 2 ( $2p_2 = 6$ ) поле  $\Phi_3$  наводит ЭДС  $E_{21} \neq 0$ , которую невозможно устранить ни укорочением шага, ни распределением катушки. Однако ЭДС фазы  $E_{\phi 23}$  можно свести к 0 путем соединения обмотки 2 в одну параллельную ветвь. Действительно, ЭДС  $E_{23}$  катушечных групп одной фазы сдвинуты в поле  $\Phi_3$  на углы  $3\alpha_{23} = 120^\circ$  и при последовательном их соединении в фазе сумма ЭДС  $E_{\phi 23} = 0$ .

Следовательно, фазы обмотки 2 ( $2p_2 = 6$ ) индуктивно не связаны с полем  $\Phi_3$  обмотки 3 ( $2p_3 = 2$ ), хотя отдельно взятые катушки (катушечные группы) обмотки 2 такую связь с полем  $\Phi_3$  имеют. Обмотку 2 можно соединить как звездой, так и треугольником с ограничением для нее по числу параллельных ветвей ( $a = 1$ ).

Итак, обмотки 3 и 2 асинхронного совмещенного электромашинного генератора с  $p_3 = 1$  и  $p_2 = 3$  взаимно-индуктивно друг с другом не связаны, если обмотка 3 ( $p_3 = 1$ ) выполнена двухслойной с шагом  $y_3 = 2/3\tau_3$ , а обмотка 2 ( $p_2 = 3$ ) соединена в одну параллельную ветвь.

Обмотку ЭМТ выполним трехфазной симметричной с фазной зоной  $\alpha = 60^\circ$  и относительным шагом обмотки  $\beta = 5/6$ .



Для проведения исследований предлагаемого устройства используется имеющаяся на кафедре электрическая машина с параметрами, близкими к тем, что указаны во втором столбце табл. 1. Эта машина имеет зубцов ровно в два раза меньше – 54 паза на статоре и 36 – на роторе. Различия параметров при таком выборе электрической машины приведены в табл. 2.

Полученные результаты исследований в пределах допустимых погрешностей можно будет считать достоверными.

Для оценки влияния обмотки на уровень гармонических составляющих используем обмоточные коэффициенты, вычисляемые по формуле

$$k_{on} = \frac{\sin\left(\frac{\pi n}{6}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{6q}\right)} \cdot \sin\left(\frac{\beta \pi n}{2}\right),$$

где  $n = 1, 3, 5, 7$  – кратность частоте основной гармоники.

Таблица 2

Параметры обмоток совмещенного электромашинного генератора

Параметры электрической машины	108/72	54/36
Количество пар полюсов АВ, $p_1$	1	1
Количество пар полюсов ЭМТ, $p_2$	3	3
Количество пар полюсов АГ, $p_3$	1	1
Количество пазов статора (ротора), $Z$ , пазов	108 (72)	54 (36)
Кол-во катушек в группе для статора ЭМТ, $q_{ЭМТс}$ , пазов	6	3
Кол-во катушек в группе для ротора ЭМТ, $q_{ЭМТр}$ , пазов	4	2
Кол-во катушек в группе для статора АГ, $q_{АГс}$ , пазов	18	9
Кол-во катушек в группе для ротора АГ, $q_{АГр}$ , пазов	12	6
Полюсное деление, $\tau_{ЭМТс}$ , пазов	18	9
Полюсное деление, $\tau_{ЭМТр}$ , пазов	12	6
Полюсное деление, $\tau_{АГс}$ , пазов	54	27
Полюсное деление, $\tau_{АГр}$ , пазов	36	18
Шаг обмотки статора (ротора) ЭМТ, $y_{ЭМТс}$ ( $y_{ЭМТр}$ ), пазов	15 (10)	7 (5)
Обмоточный коэффициент статора (ротора) ЭМТ для:		
основной гармоники, $k_{об1ЭМТс}$ ( $k_{об1ЭМТр}$ )	0,924(0,925)	0,902(0,933)
3-й гармоники, $k_{об3ЭМТс}$ ( $k_{об3ЭМТр}$ )	-0,455(-0,462)	-0,333(-0,5)
5-й гармоники, $k_{об5ЭМТс}$ ( $k_{об5ЭМТр}$ )	0,051(0,053)	-0,038(0,067)
7-й гармоники, $k_{об7ЭМТс}$ ( $k_{об7ЭМТр}$ )	-0,038(-0,041)	-0,136(-0,067)
Шаг обмотки статора (ротора) АГ, $y_{АГс}$ ( $y_{АГр}$ ), пазов	36 (24)	18 (12)
Обмоточный коэффициент статора (ротора) АГ для:		
основной гармоники, $k_{об1АГс}$ ( $k_{об1АГр}$ )	0,827 (0,827)	0,827 (0,828)
3-й гармоники, $k_{об3АГс}$ ( $k_{об3АГр}$ )	0 (0)	0 (0)
5-й гармоники, $k_{об5АГс}$ ( $k_{об5АГр}$ )	-0,166 (-0,167)	-0,168 (-0,171)
7-й гармоники, $k_{об7АГс}$ ( $k_{об7АГр}$ )	-0,119 (-0,12)	-0,121 (-0,126)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петухов, А. М. Автономный источник электропитания переменного тока стабильной частоты / А. М. Петухов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Электротехнические комплексы и системы». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – 300 с.
2. Попов, В. И. Электромашинные совмещенные преобразователи частоты / В. И. Попов. – М.: Энергия. – 175 с.