

## ЭНЕРГЕТИКА POWER ENGINEERING

**Кузьмин В. М., Дубровский И. Н.**  
**V. M. Kuzmin, I. N. Dubrovskiy**

### **ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ**

### **POWER SUPPLIES FOR DECENTRALIZED POWER SUPPLY SYSTEMS**



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

**Аннотация.** Изложены требования, предъявляемые к автономным источникам электропитания с формированием напряжения в электромашинном генераторе. Определены основные соотношения. Разработана математическая модель. Приведены результаты исследований.

**Summary.** The paper considers requirements made for independent sources of power supply with voltage shaping by an electric generator. Basic relations are defined. A mathematical model is developed. Research results are presented.

**Ключевые слова:** автономный источник, математическая модель, исследования.

**Key words:** independent source, mathematical model, research.

УДК 621.311:621.314.5

В качестве автономных источников электропитания переменного тока стабильной частоты разработано большое число различных устройств, отличающихся как принципом действия, так и конструктивным исполнением.

В децентрализованных системах с приводом постоянной скорости (ППС) получение стабильной частоты достигается путем установки между генератором и первичным валом промежуточного устройства, которое при изменении частоты вращения первичного вала поддерживает частоту вращения вала генератора неизменной. В качестве промежуточного устройства ППС могут применяться механические многоступенчатые муфты и передачи, системы с гидромуфтами и механико-гидравлическими передачами, системы с электромагнитными муфтами, тормозом и дифференциалом, а также электромашинные каскадные системы. Применение автономных источников с ППС ограничено их громоздкостью, сложностью изготовления, низким быстродействием и малой надежностью.

В автономных системах, выполненных по принципу «переменная скорость – постоянная частота» (ПСПЧ), вал генератора непосредственно связан с валом первичного двигателя, имеющего переменную частоту вращения. Стабилизация частоты выходного напряжения осуществляется посредством полупроводникового преобразователя частоты, включенного либо в цепь возбуждения, либо в цепь нагрузки генератора. Как правило, частота выходного напряжения в таких системах равна промышленной (50 Гц), а частота напряжения генератора либо равна промышленной, либо намного выше (400...600 Гц).

В децентрализованных системах энергообеспечения, использующих для получения тепловой энергии электронагревательные устройства трансформаторного типа, целесообразно использовать для питания этих устройств напряжение повышенной частоты. При изменении частоты вращения вала генератора частота и величина его напряжения могут изменяться в широких пределах (в 4...5 раз). В этом случае электродвижущая сила витка нагревательного элемента может превышать предельно допустимое значение.

Исходя из вышеизложенного, в качестве источника электропитания для децентрализованных энергосистем с электронагревателями трансформаторного типа целесообразно использовать источник, отвечающий следующим требованиям:

- 1) частота напряжения генератора должна быть выше, чем частота (промышленная) выходного напряжения источника;
- 2) схема источника должна предусматривать возможность использования электронагревателей трансформаторного типа в качестве балластной нагрузки;
- 3) в источнике должна быть предусмотрена возможность подключения электронагревателей к цепям, частоты напряжений которых отличаются друг от друга.

Указанным требованиям в полной мере отвечают автономные источники электропитания с формированием напряжения электромашинного генератора путем сложения электродвижущей силы (ЭДС) близких частот [3]. Предлагаемый источник выполнен на основе двух асинхронных машин, установленных на одном валу и расположенных в одном корпусе (см. рис. 1).

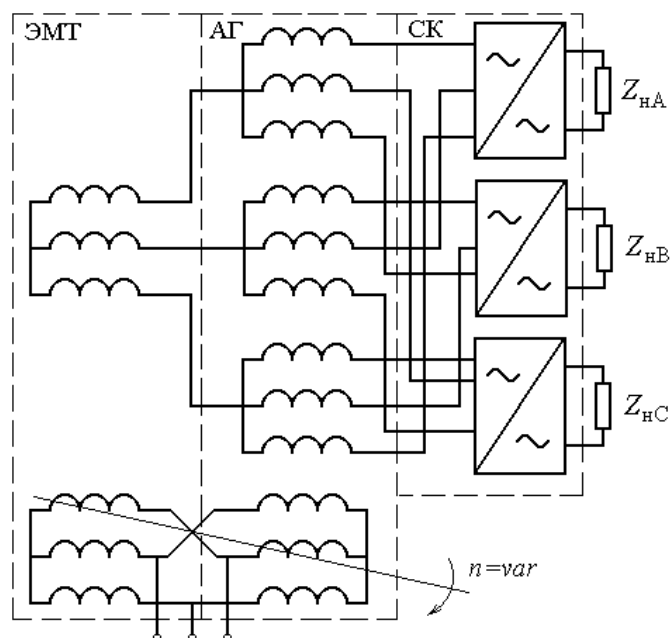


Рис. 1. Схема автономного источника с электромашинным формированием кривой выходного напряжения

Роторные обмотки машин подключены к источнику переменного тока стабильной частоты таким образом, что одна из них работает в режиме электромагнитного тормоза (ЭМТ), а другая – в режиме асинхронного генератора (АГ). Якорная обмотка ЭМТ выполне-



на в виде обычной трехфазной обмотки. На статоре АГ расположены три идентичные трехфазные обмотки, уложенные в одни пазы. Выводы статорной обмотки ЭМТ подключены к нулевым точкам статорных обмоток АГ. Силовой полупроводниковый коммутатор СК служит для выделения огибающих биений выходного напряжения электромашинного генератора.

В статорной обмотке ЭМТ и АГ индуцируется трехфазная ( $m = 3$ ) система ЭДС. При произвольном числе фаз ЭДС генератора определяются следующим образом:

- для машины, работающей в режиме ЭМТ:

$$e_{1i} = E_{1m} \sin \left[ (\omega_1 + \omega_0)t - (i-1) \frac{2\pi}{m} \right],$$

где  $E_{1m}$  – амплитуда ЭДС статорной обмотки ЭМТ;  $\omega_1$  – угловая частота ЭДС вращения;  $\omega_0$  – угловая частота тока возбуждения;  $i = 1, 2, 3$  – номер фазы статорной обмотки ЭМТ;  $m$  – число фаз статорной обмотки ЭМТ;

- в статорных обмотках АГ индуцируются ЭДС

$$e_{2j} = E_{2m} \sin \left[ (\omega_1 - \omega_0)t - (j-1) \frac{2\pi}{m} \right],$$

где  $E_{2m}$  – амплитуда ЭДС статорной обмотки АГ;  $j = 1; 2; 3$  – номер фазы статорной обмотки АГ;  $m$  – число фаз статорной обмотки АГ.

Тогда при равенстве амплитуд ЭДС машин  $E_{1m} = E_{2m} = E_m$  ЭДС электромашинного генератора определяются следующим образом:

$$e_{ij} = e_{1i} + e_{2j},$$

или

$$e_{ij} = 2E_m \sin \left[ \omega_1 t - (i+j-2) \frac{\pi}{m} \right] \cos \left[ \omega_0 t - (i-j) \frac{\pi}{m} \right]. \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что огибающие результирующих ЭДС обмоток, подключенных к первому коммутатору, сдвинуты по фазе относительно ЭДС обмоток, подключенных ко второму коммутатору на  $1/2m$  периода тока возбуждения или на  $\pi/m$  собственного периода. Аналогичным образом можно установить, что огибающие результирующих ЭДС обмоток, соединенных с третьим силовым коммутатором, сдвинуты по фазе относительно огибающих ЭДС обмоток, подключенных к первому коммутатору на  $1/m$  их собственного периода.

Таким образом, машинно-вентильный источник, схема которого приведена на рис. 1, позволяет получить три системы трехфазных модулированных напряжений со сдвигом огибающей каждой системы на треть периода. Осуществив с помощью силового коммутатора выделение модулирующих функций, можно получить трехфазное напряжение, близкое по форме к синусоидальному, частота которого будет равна частоте переменного тока возбуждения.

С целью повышения надежности децентрализованных систем электроснабжения разработаны источники, в которых электромашинные генераторы выполнены бесконтактными. Источники также содержат ЭМТ и АГ, но для достижения бесконтактности снабжены возбудителями, выполненными на основе асинхронных машин АВ или бесколлекторных машин постоянного тока (БМПТ). Принципы действия этих устройств являются такими же, как и у рассмотренного выше источника.

Одним из наиболее перспективных типов таких источников является устройство, выполненное по схеме (см. рис. 2), в которой машины, составляющие генератор, имеют числа полюсов, связанные друг с другом соотношением

$$2p_1 + p_3 = p_2,$$

где  $p_1$  – число пар полюсов обмоток возбуждителя;  $p_2$  и  $p_3$  – соответственно числа пар полюсов АГ и ЭМТ.

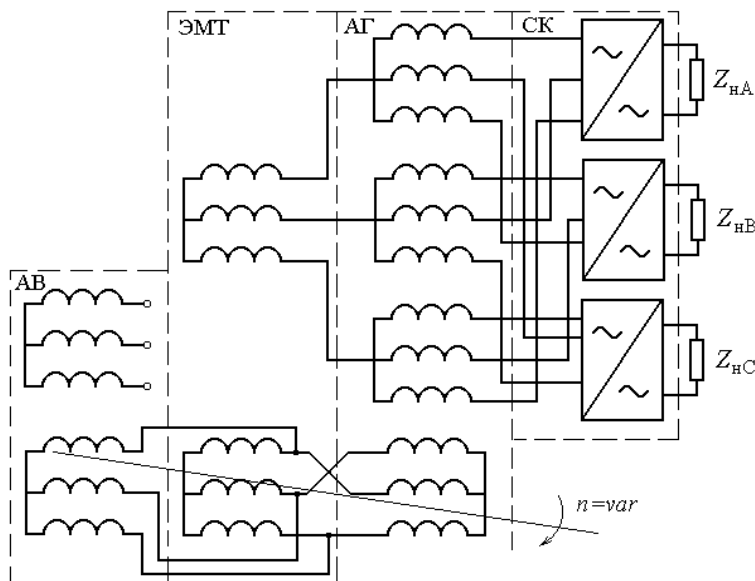


Рис. 2. Схема бесконтактного источника электропитания

Следует отметить, что машины, составляющие генератор, могут быть совмещены как по магнитным полям, так и по обмоткам. Для регулирования соотношения между выходными напряжениями ЭМТ и АГ может быть предусмотрено два отдельных для каждой машины канала регулирования. Это техническое решение позволяет, кроме магнитного и электрического совмещения машин, обеспечить самовозбуждение источника.

Анализируя электромагнитные процессы в трехфазном машинно-вентильном источнике стабильной частоты, необходимо учитывать наличие в схеме источника трех однофазных вентильных преобразователей. Это обстоятельство значительно усложняет расчеты, особенно при периодически изменяющейся амплитуде напряжения генератора [1].

Для любого однофазного вентильного преобразователя, работающего в машинно-вентильном источнике, справедливо уравнение [2]

$$\left| e_{ij} - e_{(i+1)(j+1)} \right| = 2x_k \frac{d|i_{ni}|}{d(\omega t)},$$

где  $e_{ij}$ ,  $e_{i(j+1)}$  – мгновенные значения фазных ЭДС генератора;  $x_k$  – коммутационное сопротивление фазы генератора.

Интегрируя на интервале коммутации, можно получить следующее соотношение:

$$1 - \cos \gamma_{\text{экв}} = \frac{2x_k I_{\text{нм}}}{\sqrt{3}U_{\text{м1}}},$$

где  $\gamma_{\text{экв}}$  – время, за которое эквивалентный ток генератора изменится от 0 до  $I_{\text{нм}}$ ;  $I_{\text{нм}}$  – модуль изображающего вектора тока нагрузки;  $U_{\text{м1}}$  – модуль изображающего вектора огибающей модулированного напряжения генератора.

Тогда угол сдвига фаз между основными гармоническими эквивалентного тока и напряжения генератора, определяемый коммутационным действием трех однофазных вентильных преобразователей, определится следующим образом:

$$\varphi_{\text{экв}} = \frac{1}{2} \left[ \arccos \left( 1 - \frac{2x_k I_{\text{нм}}}{\sqrt{3} U_{\text{мл}}} \right) \right]. \quad (2)$$

Уравнение внешней характеристики вентильного преобразователя, записанное в векторной форме:

$$\dot{U}_{\text{н}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \dot{U}_1 - \frac{3x_k}{\pi} \dot{i}_{\text{н}}, \quad (3)$$

где  $\dot{U}_{\text{н}}$  – изображающий вектор напряжения нагрузки источника;  $\dot{U}_1$  – изображающий вектор огибающей модулированного напряжения генератора;  $\dot{i}_{\text{н}}$  – изображающий вектор тока нагрузки.

Тогда, учитывая, что  $\dot{U}_{\text{н}} = p_{\text{т}}(L_{\text{н}} + L_{\text{к}})\dot{i}_{\text{н}} + \dot{i}_{\text{н}}R_{\text{н}}$ , и умножая уравнение (3) на координатный множитель  $e^{-j\omega_0 t}$ , получаем уравнение в векторной форме, описывающее переходные процессы в цепи нагрузки вентильного преобразователя в координатных осях  $\alpha, \beta$ , вращающихся с частотой тока нагрузки:

$$(p_{\text{т}} + j\omega_0)(L_{\text{н}} + L_{\text{к}})\dot{i}_{\text{нс}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \dot{U}_{\text{г}} - \left( R_{\text{н}} + \frac{3x_k}{\pi} \right) \dot{i}_{\text{нс}},$$

где  $\dot{i}_{\text{нс}} = \dot{i}_{\text{н}} e^{-j\omega_0 t}$ ,  $\dot{U}_{\text{г}} = \dot{U}_1 e^{-j\omega_0 t}$  – соответственно изображающие векторы тока нагрузки и амплитуды напряжения генератора в синхронно вращающихся осях.

Обозначив  $x_k = L_k \omega_0$ ,  $x_{\text{н}} = L_{\text{н}} \omega_0$ ,  $\omega_1 = k\omega_0$  и  $\rho_{\text{н}} = \frac{\kappa(\pi R_{\text{н}} + 3x_k)}{\pi(\kappa x_{\text{н}} + x_k)}$ , получим уравнение,

описывающее преобразователь в синхронном (относительном) времени как в переходном, так и в установившемся режимах работы:

$$\frac{3\sqrt{3}\kappa}{\pi(\kappa x_{\text{н}} + x_k)} \dot{U}_{\text{г}} = (p_{\text{т}} + j + \rho_{\text{н}}) \dot{i}_{\text{нс}}.$$

Спектр тока фазы электромашинного генератора представляется как результаты модуляции соответствующего тока нагрузки коммутационной функцией, которые при  $m = 3$  определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} f_{a1} &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos kn\omega_0 t; \\ f_{a2} &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos \left( kn\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ f_{a3} &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos \left( kn\omega_0 t + \frac{2\pi}{3} \right); \end{aligned} \right\}$$

где  $n = 6l \pm 1$ ;  $l = 1, 2, 3 \dots$

Если ток фазы  $A$  нагрузки  $i_{\text{нА}} = I_{\text{н}} \sin(\omega_0 t - \varphi_{\text{н}})$ , то фазные токи обмоток генератора  $i_{aq} = i_{\text{нА}} f_{aq}$ , где  $q$  – номер фазной обмотки генератора:

$$i_{aq} = \frac{4I_m}{\pi} \sin(\omega_0 t - \varphi_H) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{m}}{n} \cos \left[ kn\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} \right].$$

Очевидно, что реакция якоря в машинах, составляющих генератор, будет определяться эквивалентным током  $i_3$ , который находится как сумма токов обмоток, лежащих в одних пазах машины.

С учетом соответствующих коммутационных функций для АГ

$$i_{13} = \frac{6I_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos \left[ (kn-1)\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} + \varphi_H \right].$$

С учетом угла сдвига фаз между основными гармоническими эквивалентного тока и напряжения генератора, обусловленного коммутацией вентилей, первая гармоника эквивалентного тока АГ

$$i'_{13} = \frac{3\sqrt{3}I_m}{\pi} \cos \left[ (k-1)\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} + \varphi_H - \varphi_{\text{ЭКВ}} \right].$$

Эквивалентный ток машины, работающей в режиме ЭМТ:

$$i_{23} = \frac{6I_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{3}}{n} \cos \left[ (kn+1)\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} - \varphi_H \right]. \quad (4)$$

Первая гармоническая тока машины, работающей в режиме ЭМТ, с учетом угла коммутации вентилей

$$i'_{23} = \frac{3\sqrt{3}I_m}{\pi} \cos \left[ (k+1)\omega_0 t - (q-1) \frac{2\pi}{m} - \varphi_H - \varphi_{\text{ЭКВ}} \right]. \quad (5)$$

Анализируя выражения (4) – (5), можно заметить, что низкочастотная модуляция эквивалентных токов при симметричной нагрузке источника отсутствует. Первые гармоники эквивалентных токов имеют частоты, равные частотам ЭДС машин, составляющих генератор. В выражении (5) для определения тока  $i_{13}$  угол  $\varphi_H$  имеет знак, противоположный знаку для тока нагрузки и эквивалентного тока  $i_{23}$ . Это обусловлено алгоритмом переключения вентилей преобразователя и означает, что нагрузка для машины, работающей в режиме асинхронного генератора (АГ), имеет активно-емкостный характер при активно-индуктивной нагрузке источника.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что при симметричной нагрузке источника электрические машины генератора работают независимо друг от друга на нагрузку, параметры которой определяются передаточными характеристиками вентильного преобразователя, а также углами сдвига фаз между основными гармоническими фазных напряжений и эквивалентных токов машин.

Система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в трехфазном автономном источнике стабильной частоты, может быть записана в системе координат, вращающихся синхронно с изображающим вектором напряжения возбуждения генератора.

Применяя систему базовых величин Парка, после преобразований можно записать эту систему уравнений в виде, удобном для программирования:

- для вентильного преобразователя:

$$\left. \begin{aligned}
 p_{\tau} \dot{i}_{\text{H}} &= -(j + \rho_{\text{H}}) \dot{i}_{\text{H}} \frac{3\sqrt{3}\kappa}{\pi(\kappa x_{\text{H}} + x_{\text{K}})} \dot{e}_{\text{Г}}; \\
 \varphi_{\text{ЭКВ}} &= \frac{1}{2} \left[ \text{arcCos} \left( 1 - \frac{2x_{\text{K}} I_{\text{HM}}}{\sqrt{3} E_{\text{m1}}} \right) \right]; \\
 I_{\text{ms}} &= \frac{3\sqrt{3} \text{Sin} \varphi_{\text{ЭКВ}}}{\pi \varphi_{\text{ЭКВ}}} I_{\text{MH}}; \\
 \varphi_1 &= \varphi_{\text{ЭКВ}} - \varphi_{\text{H}}; \quad \varphi_2 = \varphi_{\text{ЭКВ}} + \varphi_{\text{H}}; \\
 z_{\text{ЭКВ}} &= \frac{E}{I_{\text{ms}}}; \quad \varphi_{\text{H}} = \text{arctg} \frac{x_{\text{H}}}{R_{\text{H}}}; \\
 r_1 &= z_{\text{ЭКВ}} \text{Cos} \varphi_1; \quad r_2 = z_{\text{ЭКВ}} \text{Cos} \varphi_2; \\
 x_1 &= z_{\text{ЭКВ}} \text{Sin} \varphi_1; \quad x_2 = z_{\text{ЭКВ}} \text{Sin} \varphi_2; \\
 \rho_{\text{H}} &= \frac{\kappa(\pi R_{\text{H}} + 3x_{\text{K}})}{\pi(\kappa x_{\text{H}} + x_{\text{K}})};
 \end{aligned} \right\}$$

- для электромашинного генератора:

$$\left. \begin{aligned}
 p_{\tau} \dot{M}_1 &= -(\rho'_{s1} - js_1) \dot{M}_1 + \rho'_{s1} \dot{N}_1; \\
 p_{\tau} \dot{N}_1 &= -(\rho'_{r1} + j) \dot{N}_1 + \rho'_{r1} \mu_{c1} \dot{N}_1 + \rho_{r1} \dot{U}_{r1}; \\
 p_{\tau} \dot{M}_2 &= -(\rho'_{s2} - js_2) \dot{M}_2 + \rho'_{s2} \dot{N}_2; \\
 p_{\tau} \dot{N}_2 &= -(\rho'_{r2} + j) \dot{N}_2 + \rho'_{r2} \mu_{c2} \dot{M}_2 + \rho_{r2} \dot{U}_{r2};
 \end{aligned} \right\}$$

- токи генератора:

$$\begin{aligned}
 \dot{i}_{s1} &= \frac{\dot{M}_1 - \dot{N}_1}{(1 - \mu_{c1})(x_{d1} + x_1)}; \quad \dot{i}_{s2} = \frac{\dot{M}_2 - \dot{N}_2}{(1 - \mu_{c2})(x_{d2} + x_2)}; \\
 \dot{i}_{r1} &= \frac{\dot{N}_1 - \mu_{c1} \dot{M}_1}{1 - \mu_{c1}}; \quad \dot{i}_{r2} = \frac{\dot{N}_2 - \mu_{c2} \dot{M}_2}{1 - \mu_{c2}},
 \end{aligned}$$

где

$$\rho_{s1} = \frac{r_{s1} + r_1}{x_{d1} + x_1}; \quad \rho_{s2} = \frac{r_{s2} + r_2}{x_{d2} + x_2}; \quad \rho_{r1} = \frac{r_{r1}}{x_{r1}}; \quad \rho_{r2} = \frac{r_{r2}}{x_{r2}};$$

$$\mu_{c1} = \frac{x_{a1}^2}{(x_{d1} + x_1)x_{r1}}; \quad \mu_{c2} = \frac{x_{a2}^2}{(x_{d2} + x_2)x_{r2}}; \quad \rho'_{s1} = \frac{\rho_{s1}}{1 - \mu_{c1}};$$

$$\rho'_{s2} = \frac{\rho_{s2}}{1 - \mu_{c2}}; \quad \rho'_{r1} = \frac{\rho_{r1}}{1 - \mu_{c1}}; \quad \rho'_{r2} = \frac{\rho_{r2}}{1 - \mu_{c2}}; \quad s_1 = 1 - \kappa; \quad s_2 = 1 + \kappa,$$

где  $\dot{e}_{\text{Г}}$  – неискаженная ЭДС генератора;  $x_{a1}, x_{a2}$  – индуктивные сопротивления реакции якоря машин генератора;  $x_{d1}, x_{d2}$  – синхронные индуктивные сопротивления;  $x_{r1}, x_{r2}$  – индуктивные сопротивления обмоток возбуждения;  $r_{s1}, r_{s2}$  – активные сопротивления статорных обмоток;  $r_{r1}, r_{r2}$  – активные сопротивления обмоток ротора;  $s_1, s_2$  – скольжения асинхронных машин.

Начальные условия при  $t = 0$ :

$$\dot{i}_H = 0; \quad \dot{M}_1 = \frac{\dot{i}_{r10}}{s_1}; \quad \dot{N}_1 = \dot{i}_{r10}; \quad \dot{M}_2 = \frac{\dot{i}_{r20}}{s_2}; \quad \dot{N}_1 = \dot{i}_{r20}.$$

Векторы неискаженных ЭДС, которыми представлен генератор для вентильного преобразователя, определяются для каждой машины в любой момент времени:

$$\dot{e}_1 = \dot{\Psi}_{r1}; \quad \dot{e}_2 = \dot{\Psi}_{r2}.$$

Тогда вектор неискаженной ЭДС за индуктивным сопротивлением коммутации определится как сумма векторов ЭДС машин

$$\underline{\dot{e}}_1 = \dot{e}_1 + \dot{e}_2.$$

Решение системы уравнений осуществляется методом Рунге-Кутты четвертого порядка. В качестве примера приведены расчетные кривые изменения во времени ЭДС, токов, напряжений и углов сдвига фаз при включении генератора на номинальную нагрузку с  $\cos \varphi_H = 0,8$  и  $E_{m1} = E_{m2}$  (см. рис. 3).

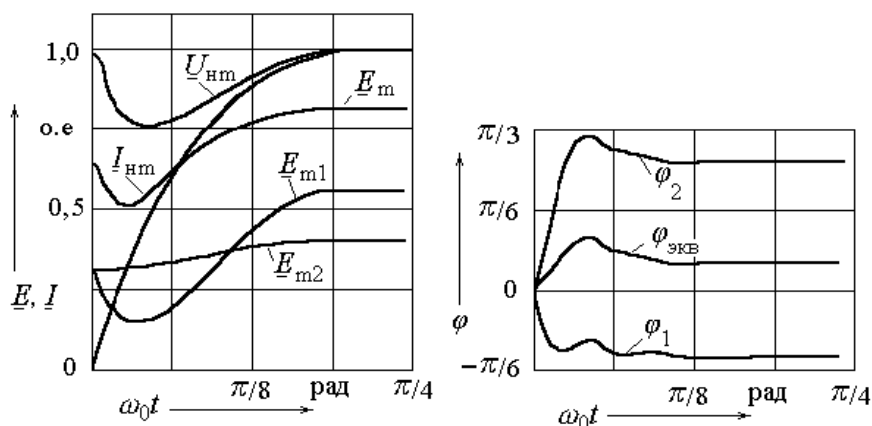


Рис. 3. Переходные процессы в автономном источнике питания при нагрузке

Анализ результатов расчета показал, что модуляционные процессы в генераторе при установившейся симметричной нагрузке источника отсутствуют, а параметры эквивалентной нагрузки генератора изменяются только во время переходного процесса в цепи нагрузки вентильного преобразователя. Следовательно, система возбуждения автоматического регулирования, балластная нагрузка, устройства электронагрева могут проектироваться без учета «низкочастотной» модуляции напряжения электрических машин, составляющих генератор.

Для подтверждения правильности результатов теоретических исследований были изготовлены физические модели рассмотренных источников питания, отличающиеся конструктивным исполнением, выходной мощностью и параметрами электромашинного генератора. Частота вращения генераторов изменялась в диапазоне от 3000 до 6000 об/мин. Экспериментальные установки имеют генераторы, выходной каскад которых состоит из двух машин, каждая из которых содержит по три трехфазных комплекта обмоток, что позволяет реализовать на макетных образцах любую из схем источников, предложенных автором. В качестве вентильного преобразователя использован преобразователь частоты с непосредственной свя-





зью (НПЧ), выполненный по мостовой схеме и с отдельным управлением вентильными комплектами.

Результаты экспериментальных исследований показали, что использование предлагаемых источников электропитания в автономных энергосистемах позволяет формировать синусоидальное напряжение на нагрузке. Анализ формы кривых изменения напряжений и эквивалентных токов машин показывает, что «низкочастотные» модуляционные процессы в генераторе при установившейся симметричной нагрузке источника отсутствуют. Эквивалентные токи машин практически синусоидальны. Искажение формы напряжений машин, составляющих генератор, обусловлено только коммутационными процессами в вентильном преобразователе.

При этом предложенная схема автономного источника электропитания позволяет генерировать четыре системы переменных напряжений:

- 1) трехфазная система синусоидальных напряжений с частотой  $\omega_0$ , не зависящей от скорости вращения вала;
- 2) трехфазная система синусоидальных напряжений с переменной частотой  $\omega_1 - \omega_0$ , зависящей от скорости вращения вала;
- 3) трехфазная система синусоидальных напряжений с переменной частотой  $\omega_1 + \omega_0$ , зависящей от скорости вращения вала;
- 4) система модулированных напряжений с переменной несущей частотой  $\omega_1$ , зависящей от скорости вращения вала и стабильной частотой огибающей  $\omega_0$ , не зависящей от скорости вращения вала генератора

Следует отметить, что такие источники, как правило, используются в энергосистемах с относительно высокой частотой вращения первичного вала (дизельэлектростанции, подвижные объекты, системы с редуцированием частоты вращения и т.д.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровский, И. Н. Автономный источник переменного напряжения стабильной частоты на основе двухмашинного совмещенного генератора / И. Н. Дубровский, В. М. Кузьмин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – № 3 (26). – Вып. 1. – С. 121-127.
2. Кузьмин, В. М. Работа НПЧ в трехфазном источнике стабильной частоты / В. М. Кузьмин, Ш. С. Ройз, А. И. Озга // Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Томск: Томский политехн. ин-т, 1984.
3. Патент на полезную модель № 82076 МПК H02M 5/48, H02K 29/00. Машинно-вентильный источник трехфазного напряжения стабильной частоты / В. М. Кузьмин, И. Н. Дубровский, А. И. Якушкин (Россия) – 2008120578/22; заявл. 23.05.2008; опубл. 10.04.2009. Бюл. № 10. – 2 с.