

УДК 537.84

Б. Б. Волчек, Г. М. Гехт, В. А. Голодняк, С. Е. Дворчик

## АНАЛИЗ КОНДУКЦИОННОГО НАСОСА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

1. Кондукционные насосы переменного тока, являющиеся вполне конкурентоспособными при небольшой гидравлической мощности [1, 2], имеют существенный недостаток — низкое значение  $\cos \varphi$  из-за неблагоприятного соотношения между активной и реактивной мощностями. Для кондукционного насоса переменного тока без учета концевых эффектов, если считать «реакцию якоря» скомпенсированной и пренебрегать вихревыми потерями в насосе по сравнению с подводимой мощностью, имеем

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_p}{P_a} = \frac{1}{q Rm} \frac{V'}{V_k} \frac{(1+k)^2}{k}; \quad \eta_e = \frac{P_r}{P_a} = \frac{1+k}{k}.$$

Здесь  $P_p$  — реактивная мощность, затрачиваемая на создание пульсирующего магнитного поля;  $P_a$  — активная мощность, подводимая к каналу;  $P_r$  — гидравлическая мощность, развиваемая насосом;  $q = v/(\omega l)$  — параметр квазистационарности ( $v$  — скорость жидкого металла в канале,  $l$  — длина канала);  $Rm = \mu_0 \sigma v l$  — магнитное число Рейнольдса;  $V', V_k$  — объемы немагнитного зазора, в котором создается магнитное поле, и канала;  $k = U_k/(E - U_k)$  — коэффициент нагрузки ( $k < -1$ );  $U_k$  — напряжение, подводимое к каналу;  $E = vBh$ ;  $h$  — ширина канала. Остальные обозначения общепринятые.

Таким образом, задачи оптимизации КПД и  $\cos \varphi$  по параметру нагрузки противоречат друг другу. Компенсировать низкий  $\cos \varphi$  можно лишь за счет внешних для канала устройств. В кондукционных и индукционных насосах компенсацию реактивной мощности осуществляют обычно с помощью дополнительных конденсаторов. Однако возможна и индуктивная компенсация реактивной мощности [3]. Автоколебательные режимы работы кондукционного жидкометаллического генератора как с индуктивной, так и с емкостной компенсацией реактивной мощности рассмотрены в [4, 5].

На рис. 1а приведена принципиальная схема двухфазного насоса с индуктивной компенсацией, описываемого системой уравнений

$$\begin{aligned} R i_1 + \omega_2 l h \frac{dB_1}{dt} + \omega_1 l h \frac{dB_2}{dt} + B_1 v h &= U \sin \omega t; \\ R i_2 + \omega_2 l h \frac{dB_2}{dt} - \omega_1 l h \frac{dB_1}{dt} + B_2 v h &= U \cos \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнениями обратных связей, аналогичными приведенным в [3],

$$B_1 = \frac{L_2}{\omega_2 h l} i_1 - \frac{L_1}{\omega_1 h l} i_2; \quad B_2 = \frac{L_2}{\omega_2 h l} i_2 + \frac{L_1}{\omega_1 h l} i_1. \quad (2)$$

Здесь  $L_1, L_2$  — индуктивности дополнительной и основной обмоток соответственно;  $\omega_1, \omega_2$  — количества витков дополнительной и основной обмоток;  $R$  — активное сопротивление, включающее в себя внутреннее сопротивление канала и сопротивление обмоток возбуждения;  $B_1, B_2$  — магнитная индукция в каналах.

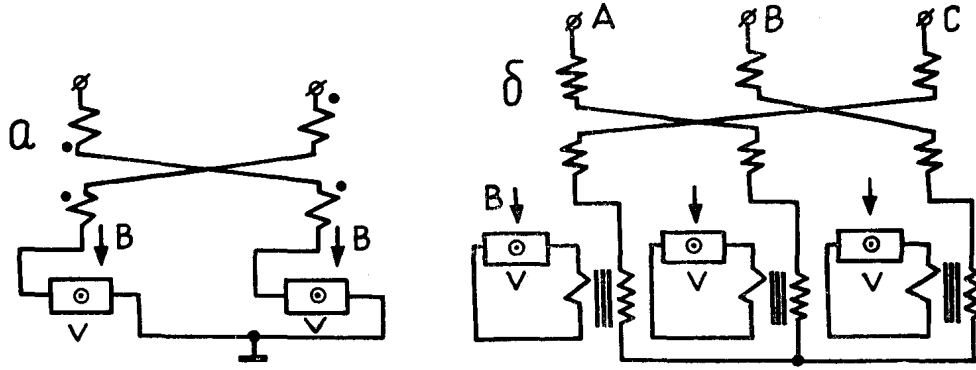


Рис. 1. Схемы двухфазного (а) и трехфазного (б) насосов с индуктивной компенсацией реактивной мощности.

Из (1) и (2) следует

$$\begin{aligned} (L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} + \left( R + \frac{L_2 v}{\omega_2 l} \right) i_1 - \frac{L_1 v}{\omega_1 l} i_2 &= U \sin \omega t; \\ (L_1 + L_2) \frac{di_2}{dt} + \left( R + \frac{L_2 v}{\omega_2 l} \right) i_2 + \frac{L_1 v}{\omega_1 l} i_1 &= U \cos \omega t. \end{aligned} \quad (3)$$

Исключив из системы (3)  $i_2$ , в линейном приближении получаем уравнение

$$\frac{d^2 i_1}{d\tau^2} + \frac{R}{\rho} (1 + \kappa) \frac{di_1}{d\tau} + i_1 = \bar{U} \sin(\nu\tau + \theta), \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \tau &= \omega_0 t; \quad \nu = \omega / \omega_0; \quad \omega_0 = [(L_1 v / \omega_1 l)^2 + R^2 (1 + \kappa)^2]^{1/2} / (L_1 + L_2); \\ \rho &= \frac{1}{2} (L_1 + L_2) \omega_0; \quad \bar{U} = \frac{U \nu}{\omega_0 (L_1 + L_2)} [(1 + \kappa_2)^2 + \kappa_1^2]^{1/2}; \\ \theta &= \arctg \frac{1 + \kappa_2}{\kappa_1}; \quad \kappa = L_2 v / (\omega_2 l R); \\ \kappa_1 &= R (1 + \kappa) / \omega (L_1 + L_2); \quad \kappa_2 = \frac{L_1 v}{\omega (L_1 + L_2) l \omega_1}. \end{aligned}$$

В насосе с емкостной компенсацией уравнение для тока принимает вид, аналогичный (4), однако  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ;  $\rho = \sqrt{L/C}$ ;  $\bar{U} = \omega CU$ . Следовательно, и в случае индуктивной компенсации имеется колебательный контур, только с несколько отличающимися от обычного  $LC$  контура параметрами. Таким образом, уравнение (4) позволяет получить амплитудно-частотную характеристику насоса в линейном приближении и без учета вихревых токов и пространственных эффектов.

Сдвиг фаз между током и напряжением в насосе с индуктивной компенсацией  $\varphi = \theta + \theta_1 - \pi/2$ , где  $\theta_1 = \arctg[(\kappa_1^2 + \kappa_2^2 - 1)/(2\kappa_1)]$ . В практически интересном случае  $\kappa_1 \ll 1$  сдвиг фаз равен нулю при  $\kappa_2^2 - 1 = 0$ , что соответствует частоте напряжения в фазе  $\omega = \omega_1 = L_1 v / [\omega_1 l (L_1 + L_2)]$ ; при этом  $\omega_0 \approx \omega_1$ . Для комплексных амплитуд токов из (3) получаем

$$i_1 = \frac{\bar{U}}{L_2 v / \omega_2 l + R} \frac{1 - iN(1 - \omega_1/\omega)}{1 + [N(1 - \omega_1/\omega)]^2}; \quad i_2 = i i_1, \quad (5)$$

где  $N = 1/\kappa_1$ .

Таким образом, при частоте внешнего питания  $\omega = \omega_1$  имеет место резонанс, ток совпадает по фазе с напряжением и реактивная мощность из источника не потребляется. При  $\omega > \omega_1$  насос является для сети индуктивной нагрузкой и потребляет мощность для создания маг-

нитного поля; при  $\omega < \omega_1$  насос отдает реактивную мощность в сеть, т. е. выполняет функцию компенсатора реактивной мощности в сети.

Для насоса с емкостной компенсацией комплексная амплитуда тока имеет вид

$$I = \frac{U}{Lv/\omega l + R} \frac{1 - iN_1(1 - \omega_0^2/\omega^2)}{1 + [N_1(1 - \omega_0^2/\omega^2)]^2}, \quad (6)$$

где  $N_1 = \omega L_2 / (L_2 v / \omega_2 l + R)$ .

Из сравнения (5) и (6) видно, что LC резонансный контур имеет более высокую добротность, так как зависимость амплитуды тока от частоты — квадратичная, в отличие от систем с индуктивной компенсацией. Следовательно, насос с индуктивной компенсацией допускает более глубокое регулирование, чем с емкостной, с сохранением требования  $\cos \varphi \approx 1$ . Аналогичные результаты могут быть получены для трехфазных и многофазных насосов. Следует также учесть (см. [4, 5]), что индуктивный колебательный контур на низких частотах ( $\approx 50$  Гц) выигрывает перед емкостными в массогабаритных соотношениях.

2. В приведенных соотношениях не учитывалась нелинейность параметров системы возбуждения. Для учета этой нелинейности воспользуемся методом линеаризации [6] в форме, используемой в [4]. В этом случае уравнение, описывающее нелинейную систему с токами, близкими к гармоническим, заменяют эквивалентным линейным уравнением с коэффициентами, определяемыми как известные функции амплитуды токов.

С учетом нелинейности системы возбуждения уравнение (4) имеет вид

$$\frac{d^2 i_1}{dt^2} + f(i_1) \frac{di_1}{dt} + i_1 = I \sin(\nu t + \theta). \quad (7)$$

Так как в режимах, близких к гармоническим, разность между диссипативным членом и правой частью в (7) мала, то в соответствии с [6] решение (7) ищем в виде

$$i_1 = a \cos(\nu t + \theta + \psi),$$

где  $a, \psi$  — медленно меняющиеся функции времени, которые определяются из системы уравнений

$$da/d\tau = Q(a, \psi); \quad d\psi/d\tau = p(a, \psi). \quad (8)$$

Здесь  $Q(a, \psi) = -\delta(a)a - [I/(1+\nu)] \cos \psi$ ;  $p(a, \psi) = 1 - \nu + [I/a(1+\nu)] \sin \psi$ ;  $\delta(a) = R(1+\kappa)/2\rho$ .

Для стационарных режимов, приравняв правые части уравнений (8) нулю, находим зависимость между амплитудой и фазой стационарного состояния и частотой:

$$(1 - \nu^2)a^2 + \delta^2(a)a^2(1 + \nu)^2 = I^2; \quad \operatorname{tg} \psi = (1 - \nu)/\delta. \quad (9)$$

Резонанс наступает при  $\nu = 1$ ; амплитуда в этом случае определяется соотношением

$$2a^2\delta^2(a) = I^2. \quad (10)$$

В системе с мягким возбуждением [4] линеаризованные индуктивности можно представить в виде  $L_1 = L_{10}(1 - \gamma a^2)$ ;  $L_2 = L_{20}(1 - \gamma a^2)$ ;  $\gamma a^2 < 1$ . В этом случае для насоса с емкостной компенсацией

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{\nu}{\omega l} \sqrt{L_0 C} \frac{1 - \alpha a^2}{1 - \gamma a^2}, \quad (11)$$

где  $\alpha = 1 + L_0 v \gamma / (\omega l R)$ . Для насоса с индуктивной компенсацией

$$\delta = \frac{1 + \kappa(1 - \gamma a^2)}{\{\kappa_{10}^2(1 - \gamma a^2)^2 + [1 + \kappa_{20}(1 - \gamma a^2)]^2\}^{1/2}}, \quad (12)$$

где  $\kappa_{20} = L_{20} v / (\omega_2 l R)$ ;  $\kappa_{10} = L_{10} v / (\omega_1 l R)$ .

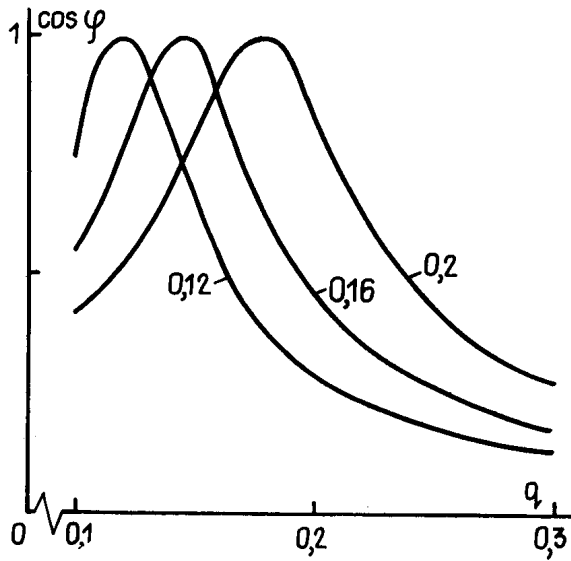


Рис. 2. Зависимости  $\cos \varphi$  трехфазного насоса с индуктивной компенсацией от параметра квазистационарности  $q$  при  $k_{12} = k_1/k_2$  (значения указаны у кривых).

Подстановка (11) и (12) в (9) позволяет определить амплитуду и фазу стационарного состояния как функции  $I$  и  $\varphi$ . при  $\nu=0$  эти соотношения дают приведенные ранее частные решения линейного уравнения.

Устойчивость стационарных режимов определяется условиями [6]

$$\begin{aligned} aQ'_a(a, \varphi) + P'_\varphi(a, \varphi) < 0, \\ Q'_a(a, \varphi) \cdot P'_\varphi(a, \varphi) - Q'_\varphi(a, \varphi) P'_a(a, \varphi) > 0. \end{aligned}$$

3. На основе приведенных выше результатов был проанализирован трехфазный кондукционный насос переменного тока с промежуточным трансформатором, принципиальная схема которого показана на рис. 1б. Насос имеет три подканала, которые могут работать независимо, параллельно или последовательно. В расчетах характеристик насоса предполагалась симметричность нагрузок, скорость в канале принята постоянной, учтены также наличие электропроводной оболочки и неоднородность растекания токов в канале в соответствии с [7].

Чтобы рассмотреть основные закономерности в трехфазном насосе с индуктивной компенсацией, запишем упрощенные соотношения для насоса, пренебрегая током холостого хода в трансформаторе, взаимоиנדуктивностями катушек, находящихся на разных стержнях обмотки возбуждения, активными потерями в стали. Уравнения приведем только для первого канала, поскольку в остальных они аналогичны:

$$\begin{aligned} (R_{\tau 1} + j\omega L_{\sigma 1}) I_1 + \dot{E}_0 + (R_{\Sigma} + j\omega L_{\Sigma}) I_1 + j\omega M (I_1 + I_2) = U_1; \\ \dot{E}_0 = - (R'_{\tau 2} + j\omega L_{\sigma 2}) I' + U_K; \quad I' = -I_1. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь  $U_i, I_i$  — комплексные действующие значения напряжения и тока в фазах ( $i=1, \dots, 3$ );  $\dot{U}_K, I'$  — то же для напряжения и тока в канале;  $R_{\Sigma}, L_{\Sigma}, M$  — сопротивление, индуктивность и взаимоиנדуктивность обмоток возбуждения, находящихся на одном стержне соответственно;  $R_{\tau i}, L_{\sigma i}$  — сопротивление и индуктивность рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора соответственно ( $i=1, 2$ ). Штрих означает, что параметр приведен к первичной обмотке трансформатора.

Выражения для тока канала и электромагнитного давления имеют вид

$$\begin{aligned} I = (R_K)^{-1} [\kappa_{IV} (1 + \xi) \dot{U}_K - \kappa_{IQ} v \dot{B} h]; \\ \dot{p}_e = (a R_K)^{-1} (\kappa_{pV} \dot{U}_K - \kappa_{pQ} v \dot{B} h) \dot{B}^*. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь  $\dot{B}$ ,  $\dot{p}_e$  — комплексные действующие значения магнитной индукции в канале и электромагнитного давления соответственно;  $\xi$  — параметр оболочки;  $R_k = h/(\sigma a l)$  — сопротивление канала;  $a$  — высота канала;  $k$  — коэффициенты, учитывающие неоднородность распределения токов в канале [7].

Результирующая магнитная индукция в канале создается основной и дополнительной обмотками, в которых токи сдвинуты относительно друг друга по фазе на  $2\pi/3$ , и равна для первого канала

$$\dot{B}_1 = [\mu_0 / (2\delta k_\delta)] [k_2 - 0,5(1 + j\sqrt{3})k_1] I, \quad (15)$$

где  $k_1 = \omega_1/2\omega_3$ ;  $k_2 = \omega_2/2\omega_3$ ;  $2\delta$  — немагнитный зазор;  $k_\delta$  — коэффициент рассеяния. Решение уравнений (13)...(15) позволяет определить все характеристики насоса.

Если пренебречь индуктивностью рассеяния промежуточного трансформатора и влиянием оболочки канала, то коэффициент мощности примет вид

$$\cos \varphi = \frac{1}{\{1 + r^2 [1 - \sqrt{3}k_1 q / 2 (k_1^2 + k_2^2 - k_1 k_2)]^2\}^{1/2}},$$

где

$$r = \omega L / R_0, \quad L = L_\Sigma - M, \quad R_0 = R_\Sigma + R_{T1} + \omega_3^2 (R_{T2} + R_k + \frac{v h \mu_0 (k_2 - 0,5 k_1)}{(2\delta) k_\delta}).$$

Соответствующим подбором витков обмоток возбуждения всегда можно получить компенсацию реактивной мощности при

$$q_{оп} = 2(k_1^2 - k_1 k_2 + k_2^2) / (\sqrt{3} k_1).$$

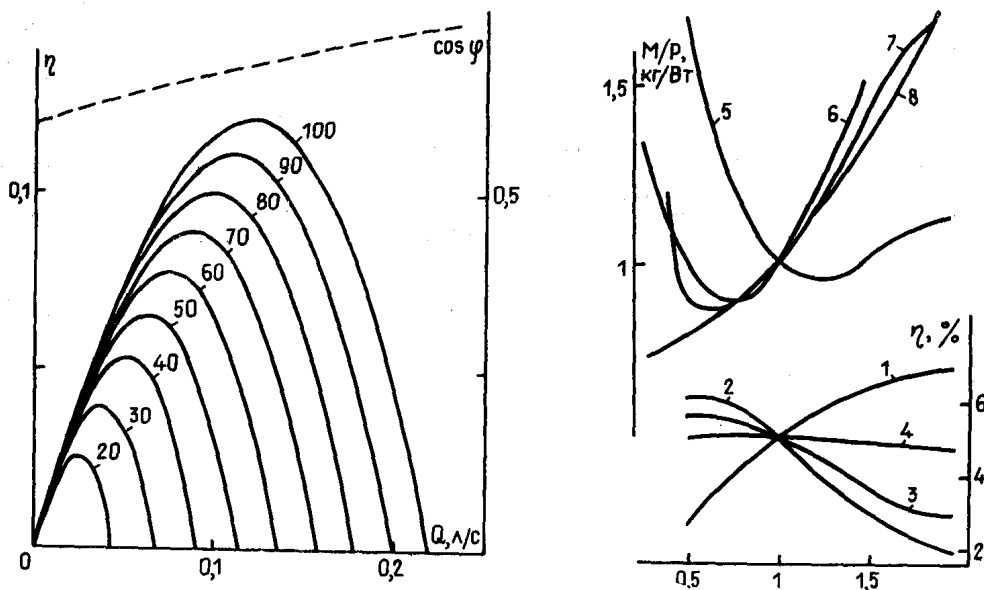


Рис. 3. Зависимости  $\cos \varphi$  (---) и КПД (—) трехфазного насоса с индуктивной компенсацией от расхода жидкого металла при значениях  $U(B)$ , указанных у кривых.

Рис. 4. Зависимости КПД (1...4) и приведенной массы  $M/P$  (5...8) от  $l/l_{*0}$  (1, 5),  $v/v_0$  (2, 6),  $a_*/a_{*0}$  (3, 7) и  $k_{12}/k_{120}$  (4, 8). Значения номинальных параметров:  $l_{*0} = 4$ ,  $v_0 = 10$  м/с,  $a_{*0} = 0,3$ ,  $k_{120} = 0,5$ . Подразумевается, что у оси абсцисс нанесены обозначения всех четырех упомянутых отношений численных значений параметров к их номинальным значениям;  $l_* = l/b$ ,  $a_* = a/b$ ,  $k_{12} = k_1/k_2$ . При изменении одного из параметров остальные три постоянны.

Как видно из рис 2, коэффициент мощности вблизи максимума меняется слабо, и, следовательно, появляется возможность в достаточно широких пределах варьировать при расчетах скорость металла и частоту питания. Это обстоятельство позволяет также достаточно глубоко регулировать машину, не снижая коэффициента мощности.

С учетом всех видов потерь, параметров трансформатора и оболочки канала были проведены расчеты кондукционного электромагнитного насоса гидравлической мощностью 10 Вт при частоте питания 50 Гц и рабочего тела с  $\sigma=1,7 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Так как реально невозможно одновременно достичь максимумов коэффициента мощности и КПД, то при выборе номинального режима необходимо идти на разумный компромисс. Результаты расчетов приведены на рис. 3. Учет индуктивности рассеяния трансформатора и оболочки канала приводит к более пологому нарастанию коэффициента мощности по сравнению с приведенным на рис. 2 и к смещению  $q_{оп}$  в сторону больших значений. Проанализировано влияние некоторых параметров на основные характеристики насоса; результаты этого анализа представлены на рис. 4, из которого видно, что отклонение некоторых параметров от номинальных значений может достаточно резко повлиять на характеристики насоса.

Таким образом, проведенный анализ показал возможность существенного повышения коэффициента мощности кондукционных насосов переменного тока благодаря созданию специальных индуктивных связей между фазами обмоток.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов И. Р., Семиков Г. Т. Электромагнитные насосы для жидких металлов. Параметры, конструкция, эксплуатация. — Л., 1980. — 64 с.
2. Obszak P. Electromagnetic pumps for sodium cooled reactors // Pumps for nuclear power plants. — 1974. — P. 133...139.
3. Волчек Б. Б., Гехт Г. М., Голодняк В. А., Дворчик С. Е., Кривченко Е. Г. Резонансная безъёмкостная компенсация реактивной мощности МГД-насосов переменного тока // 13-е Риж. совещ. по магнит. гидродинамике. Т. 2. — Саласпилс, 1990. — С. 67, 68.
4. Дворчик С. Е. Автоколебания в кондукционном однофазном МГД-генераторе // Магнит. гидродинамика. — 1969. — № 3. — С. 81...84.
5. Дворчик С. Е. Многофазные МГД-генераторы индуктивного возбуждения // Магнит. гидродинамика. — 1969. — № 3. — С. 85...89.
6. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. — М., 1974. — 503 с.
7. Гехт Г. М. Электромагнитные процессы в кондукционных насосах переменного тока с секционированными электродами // МГД-процессы в энергоустановках. — М., 1985. — С. 125...130.

Поступила в редакцию 07.04.92 (22.01.92)