

А. Гайлитис*

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ АЗИМУТАЛЬНОЙ МОДЫ В БОЛЬШИХ ИНДУКЦИОННЫХ НАСОСАХ

A winding scheme has been proposed with the aim to stabilize the operation of large induction pumps for well conducting liquid metals, mainly for sodium. This winding contains a set of coils shifted with respect to each other transversally to the flow. These are connected electrically in parallel and are eliminating, thus, the transversal nonuniformity of the magnetic field; simultaneously, the velocity profile is being levelled.

Введение. Небольшие индукционные цилиндрические насосы работают устойчиво, в то время как в больших натриевых насосах этого типа наблюдается азимутальная неустойчивость [1], имеющая электрическую природу.

Если в некоторой части канала насоса скорость течения натрия несколько меньше ее среднего значения, то индуцированный ток здесь сильнее, и, следовательно, внешнее магнитное поле частично экранируется. В небольших насосах экранирование выражено слабо, и из-за увеличения тока возрастает и электромагнитная сила (произведение поля и тока), стремящаяся выровнять течение. В больших насосах экранирование превалирует над ростом тока; чем медленнее течение натрия, тем меньше сила. Возмущение скорости продолжает расти до тех пор, пока течение не будет разделено на две зоны. Одна из них работает как насос, тогда как вторая представляет собой байпас, через который натрий бесполезно течет обратно.

Насосы мощностью в сотни киловатт могут быть построены для устойчивой работы при надлежащих конструировании и оптимизации по частоте [2]. Предпринимались попытки стабилизировать работу насосов путем увеличения их гидравлического сопротивления, а также и искажения профиля магнитного поля [3].

Для более крупных насосов необходимы новые способы стабилизации. В этой статье описывается нетрадиционная конструкция катушек индуктора. Катушки компенсируют экранирование поля и, следовательно, предотвращают азимутальную неустойчивость.

Эквивалентные схемы. В первом приближении две зоны течения могут рассматриваться как объединение двух элементарных насосов. Для течения натрия оба эти насоса работают параллельно. При традиционной конструкции катушек их включение эквивалентно последовательному электрическому соединению в обоих насосах, поскольку каждый провод силовой катушки охватывает обе зоны, и питание обоих насосов осуществляется одним и тем же током I . Рабочий режим характеризуется кривыми $p(Q)$ элементарных насосов. У небольших насосов общая кривая $p(Q)$ всегда спадающая, и элементарные насосы работают в одной и той же точке. В случае больших насосов

* A. Gailitis (Institute of Physics, Latvian Academy of Sciences). Electrical Stabilization of Azimuthal Mode for Large Induction Pumps. Русский текст автора.

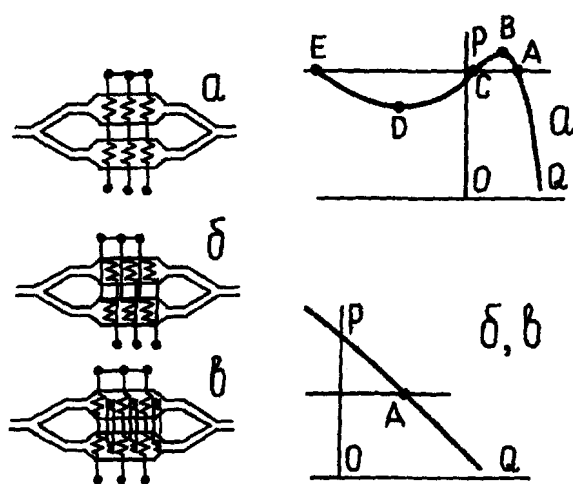


Рис. 1.

из-за экранирования поля кривые $p(Q) \big|_{I=\text{const}}$ получают немонотонными (рис. 1,а). На возрастающем участке характеристики BD оба насоса не могут работать одновременно. Если даже попытаться совместить их рабочие режимы в точке C , а потом предоставить их самим себе, то режим одного из них переместится в точку A , а другого — в E [1].

Соединение катушек, предлагаемое ниже, эквивалентно параллельному электрическому соединению элементарных насосов (рис. 1,б), подключенных к источнику определенного напряжения U . Если поперечное сечение катушек достаточно велико, то экранирование магнитного поля компенсируется пониженной индуктивностью и, следовательно, кривые $p(Q) \big|_{I=\text{const}}$ спадают монотонно, течение становится однородным и устойчивым.

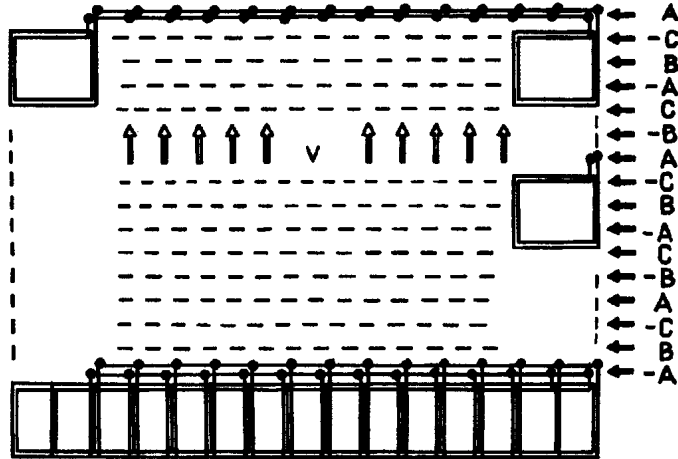
Предлагаемые катушки сложнее обычных, путь тока — длиннее, а потери мощности выше. Тем не менее, возможно использование в одном насосе двух катушек — обычной, в качестве катушки возбуждения, и предлагаемой нами в качестве стабилизирующей катушки (рис. 1,в). Когда скорости течения одинаковы, ток в короткозамкнутой стабилизирующей цепи отсутствует, потому что в обоих плечах этого замкнутого контура индуцируются ЭДС, равные по величине, но противоположные по направлению. Различие скоростей течения приводит к появлению тока, стремящегося выравнять разницу этих скоростей. Среднее значение стабилизирующего тока зависит от среднего значения возмущения расхода течения и степени неизбежной асимметрии конструкции насоса.

Конструкция катушек. Традиционная обмотка для цилиндрического насоса представляет собой одномерную последовательность одинаковых элементов, смещенных один относительно другого по направлению течения. При подключении обмотки к трехфазной сети возбуждается бегущее магнитное поле.

Для стабилизации течения предлагается конструкция обмоток в виде двумерной последовательности, например прямоугольных катушек, смещенных одна к другой в обоих — продольном и поперечном (азимутальном) — направлениях по отношению к оси канала.

Начальным элементом обмотки является катушка размером $\tau \times R \Delta \varphi$, намотанная несколькими витками провода с общим поперечным сечением S (рис. 2, τ — полюсный шаг). В цилиндрическом насосе исполь-

Рис. 2.



зуются катушки, согнутые в направлении φ до радиуса. Из таких катушек составляется пояс; каждая катушка повернута относительно предыдущей на угол $\delta\varphi = 2\pi/n$. Все катушки одного пояса соединены параллельно. Каждый пояс сдвинут относительно предыдущего на расстояние δx . Катушки обмотки возбуждения пояса подключены к трехфазной сети. Если катушки используются в качестве стабилизирующих, они ни к чему не подключены. Разумеется, для размещения обмотки в магнитном ярме необходима система как продольных, так и поперечных пазов.

Стабилизирующие катушки могут быть более простой конструкции, а именно, они могут состоять из электрически изолированных закороченных витков в форме цифры 8 (рис. 3).

Катушки смещены относительно друг друга на интервалы $\delta\varphi$ и δx , как уже описано выше. Эта схема оказывает стабилизирующее действие на меньшее число мод нежели предыдущая схема.

Расчет стабилизирующего эффекта. Независимо от того, используется ли обмотка (рис. 2) для возбуждения поля или только для стабилизации, ее стабилизирующий эффект один и тот же. В связи с этим мы в дальнейшем рассмотрим случай, когда ток возбуждения течет по отдельной обмотке возбуждения с линейной нагрузкой $\sqrt{2} A \exp [i(\alpha x - \omega t)]$, аналогичной [1]. Пусть суммарная линейная нагрузка для обеих обмоток есть

$$A(x, \varphi, t) = \sqrt{2} A [1 + a(\varphi)] \exp [i(\alpha x - \omega t)]. \quad (1)$$

Остальные допущения те же, что и в [1]. $V_0 = \omega/\alpha = \omega\tau/\pi$; $Q_0 = 2\pi r \delta_h V_0$ — синхронная скорость и расход; $P_0 = L \lambda V_0^2 / (2\delta_h)$ — гидравлические потери при синхронной скорости; $B(x, \varphi, t) = B(\varphi) \exp [i(\alpha x - \omega t)]$ — магнитное поле; $v(\varphi) = V(\varphi)/V_0$, $p = P/P_0$, $q = Q/Q_0$, $b(\varphi) = B(\varphi) \delta_m \alpha / (\sqrt{2} \mu_0 A)$ — безразмерные скорость, давление

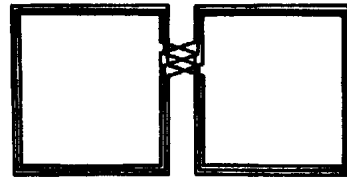


Рис. 3.

ние, расход и поле соответственно; $j^2 = 2\mu_0\alpha A^2\delta_n / (\lambda\rho\alpha\omega\delta_m^2)$ — квадрат безразмерного тока питания; $k = (\alpha R)^{-2}$; $\varepsilon = \mu_0\sigma\omega\delta_n / (\alpha^2\delta_m)$.

Выразив поле через ток и приравняв силы таким же образом, как и при выводе уравнений (25) и (26) в [1], получим

$$\{kd^2/d\varphi^2 - 1 + i\varepsilon [1 - v(\varphi)]\} b(\varphi) = i [1 + a(\varphi)]; \quad (2)$$

$$p = (j^2/\varepsilon) \operatorname{Re} \{b^*(\varphi) [1 + a(\varphi)]\} - v^2(\varphi) \operatorname{sign} v(\varphi).$$

Предел устойчивости определяется тем, что системе (2) удовлетворяет решение

$$v(\varphi) = q + \delta v_m \cos m\varphi, \quad b(\varphi) = b_0 + \delta b_m \cos m\varphi, \quad (3)$$

$$b_0 = [i + \varepsilon (1 - q)]^{-1},$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$; $|\delta v_m| \ll 1$; $|\delta b_m| \ll |b_0|$.

По сравнению с [1] в (2) появилось новое слагаемое $a(\varphi)$. Чтобы выразить $a(\varphi)$ через b_m , для каждого пояса должны использоваться законы Кирхгофа и индукции. Предполагается, что число катушек достаточно большое, чтобы соседние катушки были сдвинуты относительно друг друга незначительно как в азимутальном, так и в аксиальном направлениях ($\delta\varphi \ll 1$ и $\delta x \ll \tau$). Просуммировав все токи, имеем:

$$a(\varphi) = -\varepsilon\eta(m) \delta b_m \cos m\varphi, \quad (4)$$

где

$$\eta(m) = (\varepsilon_c/\varepsilon k) (2/m\Delta\varphi)^2 \sin^2 (m\Delta\varphi/2) \quad (5)$$

для обмотки, приведенной на рис. 2, и

$$\eta(m) = (\varepsilon_c/\varepsilon k) (2/m\Delta\varphi)^2 \sin^4 (m\Delta\varphi/2) \quad (6)$$

для обмотки на рис. 3; далее $k = 1 + \pi/(\alpha R\Delta\varphi)$ — коэффициент удлинения обмотки; $\varepsilon_c = \mu_0\sigma_c\delta_c\omega/(\alpha^2\delta_m)$; $\delta_c = 2S\Delta\varphi/(\delta x \delta\varphi)$ и σ_c — эффективная толщина и проводимость стабилизирующей обмотки.

Линеаризуя (2), получаем уравнения

$$\begin{aligned} [-m^2k - 1 + i\varepsilon (1 - q)] \delta b_m &= i\varepsilon b_0 \delta v_m - i\varepsilon\eta \delta b_m; \\ j^2 \operatorname{Re} (\delta b_m - \varepsilon\eta b_0^* \delta b_m) &= 2 |q| \varepsilon \delta v_m. \end{aligned} \quad (7)$$

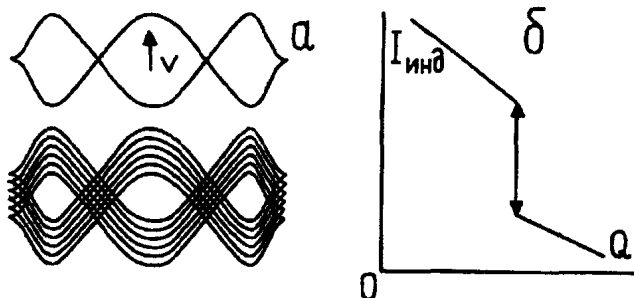
Уравнения (7) определяют условие нулевой устойчивости

$$p_m = \frac{2 |q| (1 - q) \{(1 + m^2k)^2 + \varepsilon^2 [1 - q + \eta(m)]^2\}}{\varepsilon^2 (1 - q)^2 - 1 - m^2k - \varepsilon^2\eta^2(m)} - |q| |q| \quad (8)$$

с дополнительным требованием, чтобы $\varepsilon^2 (1 - q)^2 - 1 - m^2k - \varepsilon^2\eta^2(m) > 0$.

Уравнения (7), в отличие от (31) в [1], содержат параметр $\eta(m)$, заданный формулами (5) и (6). Поскольку $\eta(m) > 0$, предлагаемые обмотки всегда увеличивают устойчивость. Мода с $m = \pi/\Delta\varphi$ подавляется обеими обмотками в равной мере. Для остальных мод обмотка согласно рис. 2 более эффективна. В качестве примера можно привести медную катушку квадратной формы ($R\Delta\varphi = \tau$). Ее электрическая проводимость в пять раз выше проводимости натрия ($\sigma_c/\sigma \approx 5$). Если объем стабилизирующей обмотки равен объему натрия в канале насоса, все моды с $m < \pi R/\tau$ во всем объеме насоса оказываются подавленными. В номинальной рабочей точке больших насосов с целью увели-

Рис. 4.



чения КПД скольжение выбирается малым. Следовательно, нет необходимости стабилизировать весь объем насоса и стабилизирующая обмотка может иметь меньшую массу. Чтобы выяснить, насколько может быть приближена к рабочей точке область неустойчивости, необходимо проанализировать уровень возмущений всех мод. Тщательным изготовлением и центровкой все технологические неточности должны быть сведены к минимуму. В таком случае стабилизирующая обмотка должна подавлять лишь те возмущения, которые порождаются турбулентностью течения и другими неизбежными причинами.

Предварительный эксперимент. Использовали старый плоский индукционный насос с двумя индукторами по обеим сторонам канала. Верхний индуктор удаляли, и на верхней поверхности канала закрепляли стабилизирующую обмотку. Затем верхний индуктор возвращали на место. Немагнитный зазор при этом, конечно, увеличивался на толщину стабилизирующей обмотки, которая, в свою очередь, состояла из укороченных витков, имеющих форму двойной восьмерки (рис. 4,а), так как в плоских насосах основные возмущения возникают в двух пристенных областях канала. Эффект стабилизации в испытаниях в какой-то мере был подтвержден. В одном из витков был измерен индуцированный ток; при определенном скольжении был замерен его скачок (рис. 4,б).

Выводы. Предлагаемые стабилизирующие обмотки могут по крайней мере в принципе стабилизировать азимутальную моду. Обмотки сложны и дороги и существенно увеличивают немагнитный зазор. Тем не менее они представляют собой средство стабилизации режима больших насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайлитис А., Лиелаусис О. Неустойчивость однородного распределения скоростей в индукционной МГД машине // *Магнит. гидродинамика*. — 1975. — № 1. — С. 87...101.
2. Андреев А. М., Безгачев Е. А., Карасев В. Г., Кириллов И. Р., Огородников А. П., Преслицкий Г. В., Чвартацкий Р. В. Электромагнитный насос ЦЛИН-3/3500 // *Магнит. гидродинамика*. — 1988. — № 1. — С. 61...68.
3. Кириллов И. Р., Огородников А. П., Остапенко В. П., Преслицкий Г. В. Подавление неустойчивости в линейных индукционных насосах при $R_{ms} > 1$ модификацией внешнего магнитного поля // *Магнит. гидродинамика*. — 1981. — № 4. — С. 105...109.

Поступила в редакцию 14.12.92