



ПОГРУЖНОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ. НУЖЕН ЛИ НЕФТЯНИКАМ $\cos\phi = 1$?

САТАЛОВ Анатолий Михайлович

Заведующий отделом погружных
электроприводов ОКБ БН КОННАС, к.т.н.

ХОЦЯНОВА Ольга Николаевна

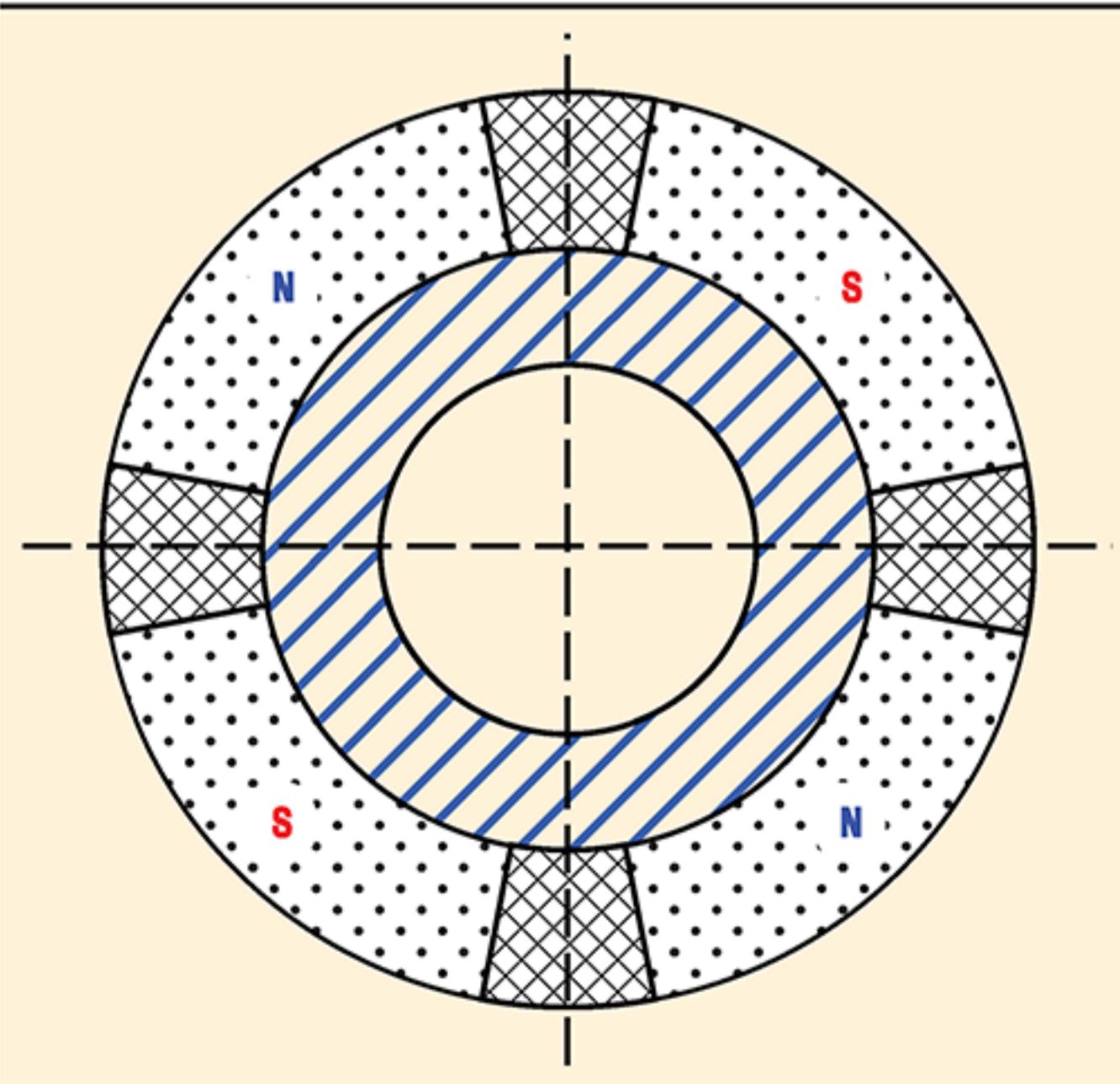
Заместитель зав. отделом погружных
электроприводов ОКБ БН КОННАС, к.т.н.

Работники сервисных подразделений АО «Новомет-Пермь» как в России, так и за рубежом постоянно сталкиваются с требованиями нефтяников обеспечить коэффициент мощности, потребляемой погружным вентильным электродвигателем, близкий либо равный единице. Это требование становится следствием автоматического распространения на ВПЭД опыта работы с «традиционными» электроприводами на асинхронных двигателях. Ведь в случае последних уменьшение $\cos\phi$ однозначно приводит к увеличению потребляемого двигателем тока и потерь.

Вместе с тем, как показывают приведенные авторами настоящей статьи расчеты, для ВПЭД предпочтителен режим минимальных токов, при котором его энергетические показатели и перегрузочная способность выше, а перегрев обмотки, наоборот, ниже, чем при $\cos\phi = 1$. Кроме того, реализация режима минимального тока позволяет либо снять с двигателя дополнительную мощность, либо уменьшить длину его активной части.

При питании двигателя от станции управления (СУ) с частотным преобразователем коэффициент потребляемой из сети мощности определяется свойствами СУ и практически не связан с коэффициентом мощности двигателя. Для вентильного двигателя в отличие от асинхронного связь между величиной потребляемого тока и величиной $\cos\phi$ носит совершенно иной характер. Для ВПЭД существует возможность управления величиной $\cos\phi$ путем изменения напряжения, подводимого к двигателю, вплоть до достижения режима $\cos\phi=1$.

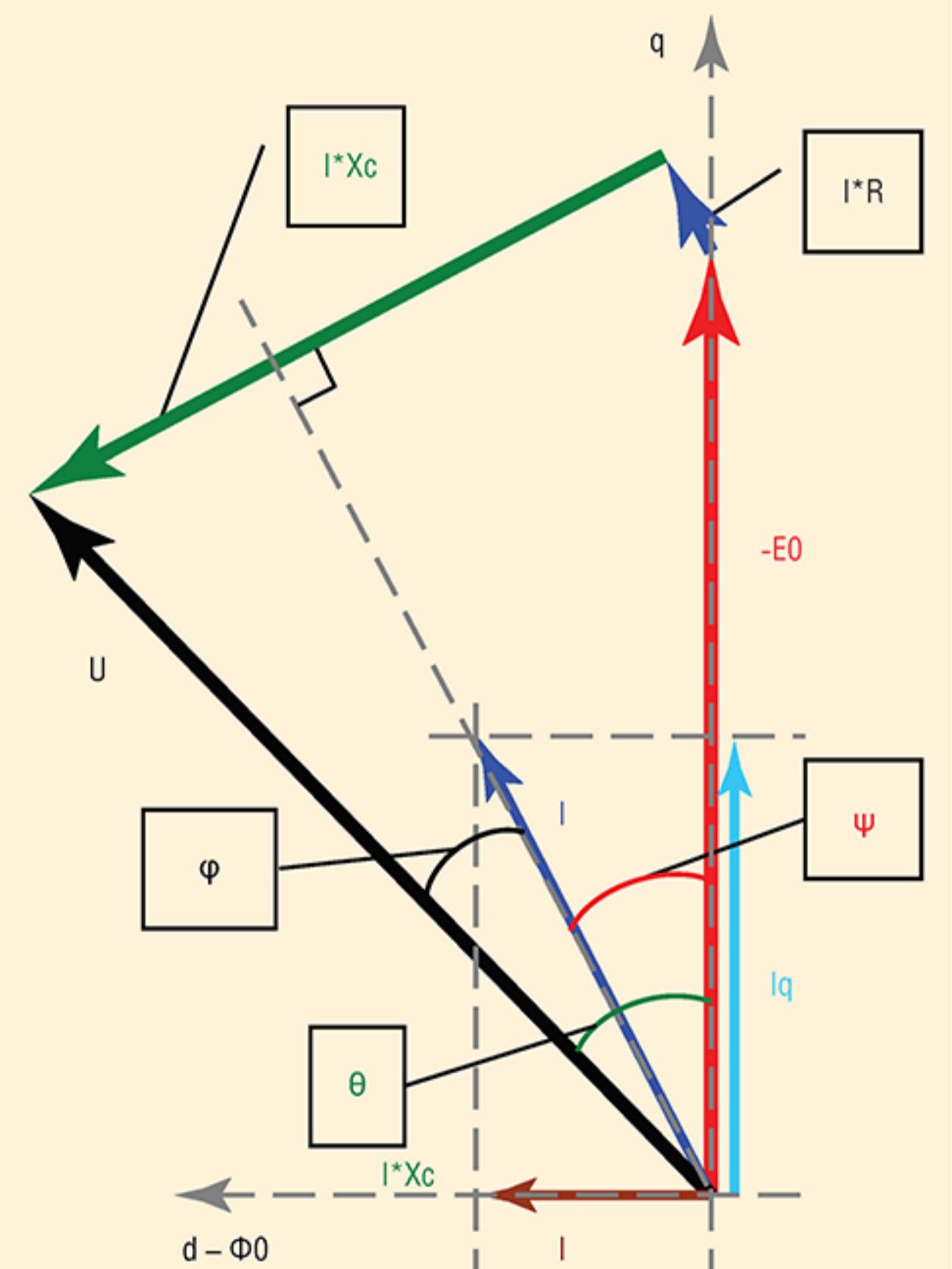
Рис. 1. Конструкция ротора погружного вентильного двигателя



Так, в каких же случаях режим $\cos\phi = 1$ целесообразен, а в каких - приводит к дополнительному расходу электроэнергии? Рассмотрим наиболее простой с точки зрения теории случай, когда вентильный двигатель выполнен с возбуждением от постоянных магнитов, расположенных на роторе, причем магниты своей внешней поверхностью обращены к зазору (рис. 1).

В этом случае можно считать, что магнитная проводимость по продольной оси d равна проводимости по поперечной оси q, и векторная диаграмма при питании от СУ с синусоидальным выходным напряжением принимает простейший вид (рис. 2).

Рис. 2. Векторная диаграмма при питании от СУ с синусоидальным выходным напряжением



E_0 – ЭДС холостого хода

I – ток

I_q – ток по поперечной оси

I_d – ток по продольной оси

U – фазное напряжение

X_c – синхронное сопротивление

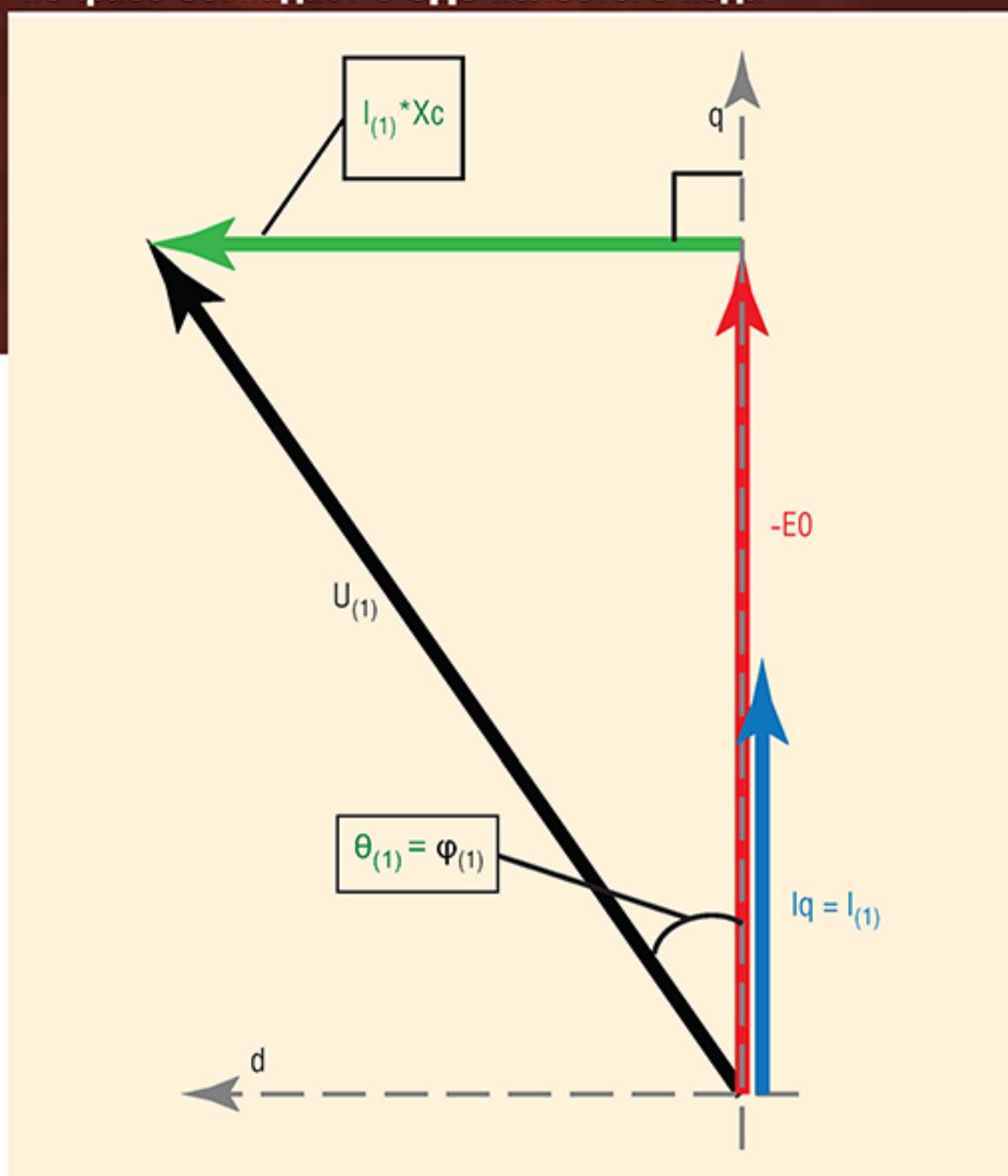
R – активное сопротивление фазы

φ – угол между векторами напряжения и тока

ψ – угол между векторами тока и ЭДС холостого хода

Θ – угол между векторами напряжения и ЭДС холостого хода
(угол нагрузки)

Рис. 3. Векторная диаграмма режима, когда ток по фазе совпадает с ЭДС холостого хода



Электромагнитный момент, приложенный к ротору двигателя, определяется выражением:

$$M_{\text{эм}} = m \cdot E_0 \cdot I_{(1)} / \Omega_{\text{мех}},$$

где m – число фаз, $\Omega_{\text{мех}}$ – механическая частота вращения.

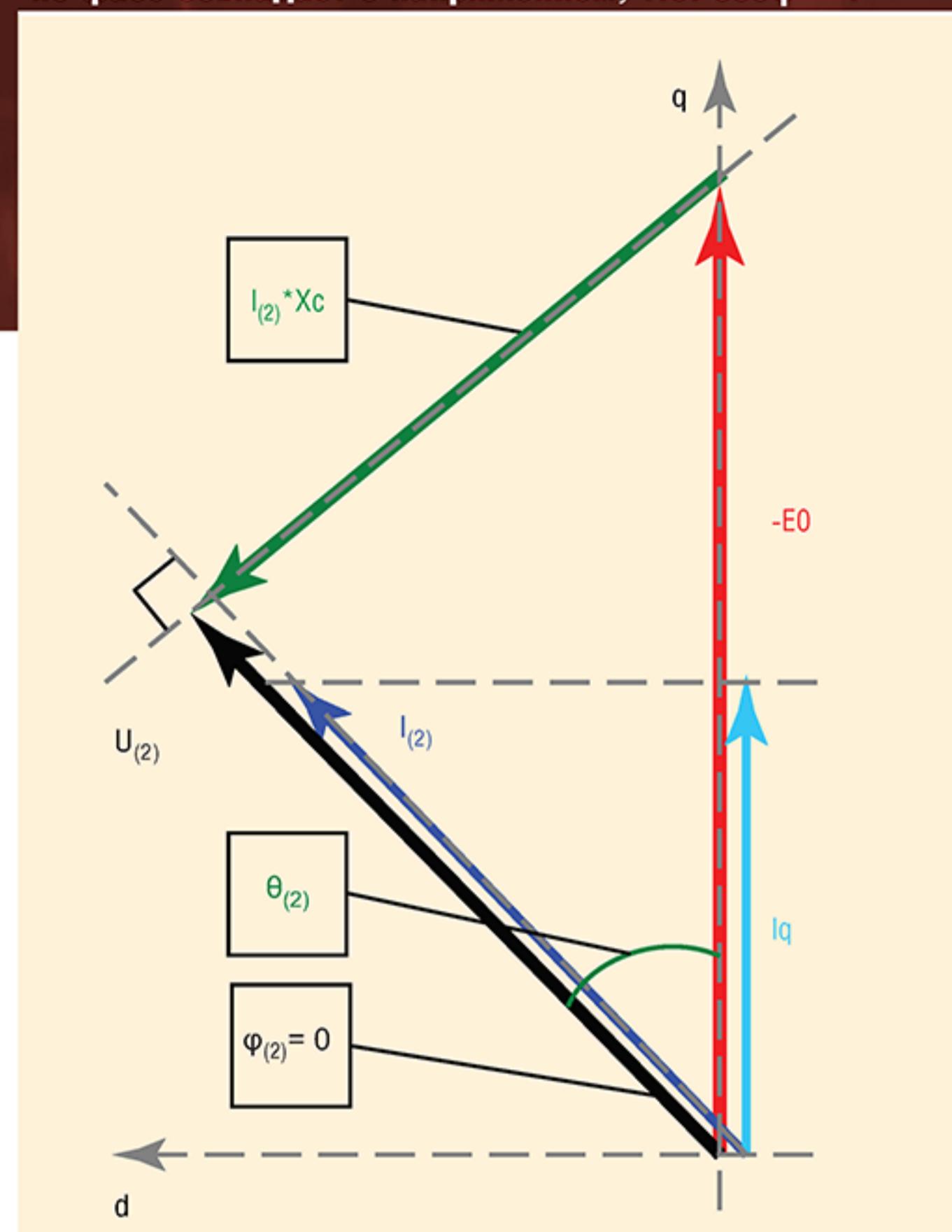
Очевидно, что момент на валу будет постоянным при изменении напряжения и тока при условии, что величины электродвижущей силы (ЭДС) холостого хода E_0 и ток по поперечной оси $I_{(1)}$ останутся постоянными.

Рассмотрим два крайних режима для двигателя с одним и тем же моментом нагрузки: первый (нижний индекс (1)), когда ток по фазе совпадает с ЭДС холостого хода, и второй (нижний индекс (2)), когда ток по фазе совпадает с напряжением, т.е. $\cos\phi = 1$. Для простоты пренебрежем активным сопротивлением, поскольку его величина не повлияла бы на сделанные выводы.

Первому режиму соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 3. Здесь угол $\Psi_{(1)} = 0$, $I_{(1)} = I_{(2)}$, $\Phi_{(1)} = \Theta_{(1)}$, $U = E_0 / \cos\Theta_{(1)}$. Вектор $I \cdot X_c$ падения напряжения на синхронном сопротивлении перпендикулярен вектору тока и образует с ним угол, равный 90° .

Из теории электрических машин известно, что врачающий момент представляет собой векторное произведение тока статора на магнитный поток, создаваемый ротором [1]. Поскольку наведенная магнитным потоком ротора ЭДС холостого хода E_0 отстает от него на 90° , максимальный момент двигатель будет создавать при совпадении векторов тока I и ЭДС $-E_0$, т.е. весь ток пойдет на создание врачающего момента. Следовательно, величина тока для данного врачающего момента будет минимальной. Полная мощность $S_{(1)}$, потребляемая двигателем, в этом случае определяется выражением:

Рис. 4. Векторная диаграмма режима, когда ток по фазе совпадает с напряжением, т.е. $\cos\phi = 1$



$$S_{(1)} = \sqrt{3} \cdot U_{(1)} \cdot I_{(1)} = \sqrt{3} \cdot E_0 \cdot I_{(1)} / \cos\phi_{(1)} = \sqrt{3} \cdot E_0 \cdot I_{(1)} / \cos\Theta_{(1)}. \quad (1)$$

Обычно двигатель проектируется так, чтобы угол $\Phi_{(1)}$ был близок 30 электрическим градусам.

Векторная диаграмма для второго случая представлена на рис. 4.

Для него характерны $\Phi_{(2)} = 0$, $\Psi_{(2)} = \Theta_{(2)}$, $U_{(2)} = E_0 \cdot \cos\Theta_{(2)}$, $I_{(2)} = I_{(1)} / \cos\Theta_{(2)}$. В этом режиме электродвигатель не потребляет реактивного тока.

Полная подводимая мощность при одинаковом электромагнитном моменте равна

$$S_{(2)} = \sqrt{3} \cdot U_{(2)} \cdot I_{(2)} = \sqrt{3} \cdot E_0 \cdot I_{(2)}. \quad (2)$$

Разделив выражение (2) на выражение (1), получим:

$$\frac{S_{(2)}}{S_{(1)}} = \cos\phi_{(1)}, \quad \text{или } S_{(2)} = S_{(1)} \cdot \cos\phi_{(1)} = S_{(1)} \cdot \cos\Theta_{(1)}. \quad (3)$$

Поскольку угол ϕ отличен от нуля, двигатель в первом режиме потребляет дополнительную реактивную мощность. Она проявляется в увеличенном значении напряжения:

$$U_{(1)} = U_{(2)} / (\cos\Theta_{(1)} \cdot \cos\Theta_{(2)}). \quad (4)$$

С другой стороны, во втором режиме ток $I_{(2)} = I_{(1)} / \cos\Theta_{(2)} = I_{(1)} / \cos\Theta_{(1)}$, следовательно, несмотря на меньшую потребляемую полную мощность, величина потребляемого тока выше, чем в первом режиме.

Рассмотрим, как сказывается режим работы электропривода УЭЦН на потерях в его элементах: двигателе, кабеле, трансформаторе и станции управления.

ДВИГАТЕЛЬ

Потери в двигателе в значительной мере определяются током в нем и практически не зависят от напряжения.

Соотношение потерь в меди двигателя в режимах 1 и 2 определяется выражением:

$$P_{M(1)}/P_{M(2)} = (m \cdot I_{(1)}^2 \cdot R)/(m \cdot I_{(2)}^2 \cdot R) = 1/(\cos\Theta_{(2)})^2. \quad (5)$$

КАБЕЛЬ

Соотношение потерь в кабеле $P_{K(1)}$ и $P_{K(2)}$ определяется выражением (5), в котором активное сопротивление фазы двигателя следует заменить на сопротивление жилы кабеля R_K .

ТРАНСФОРМАТОР

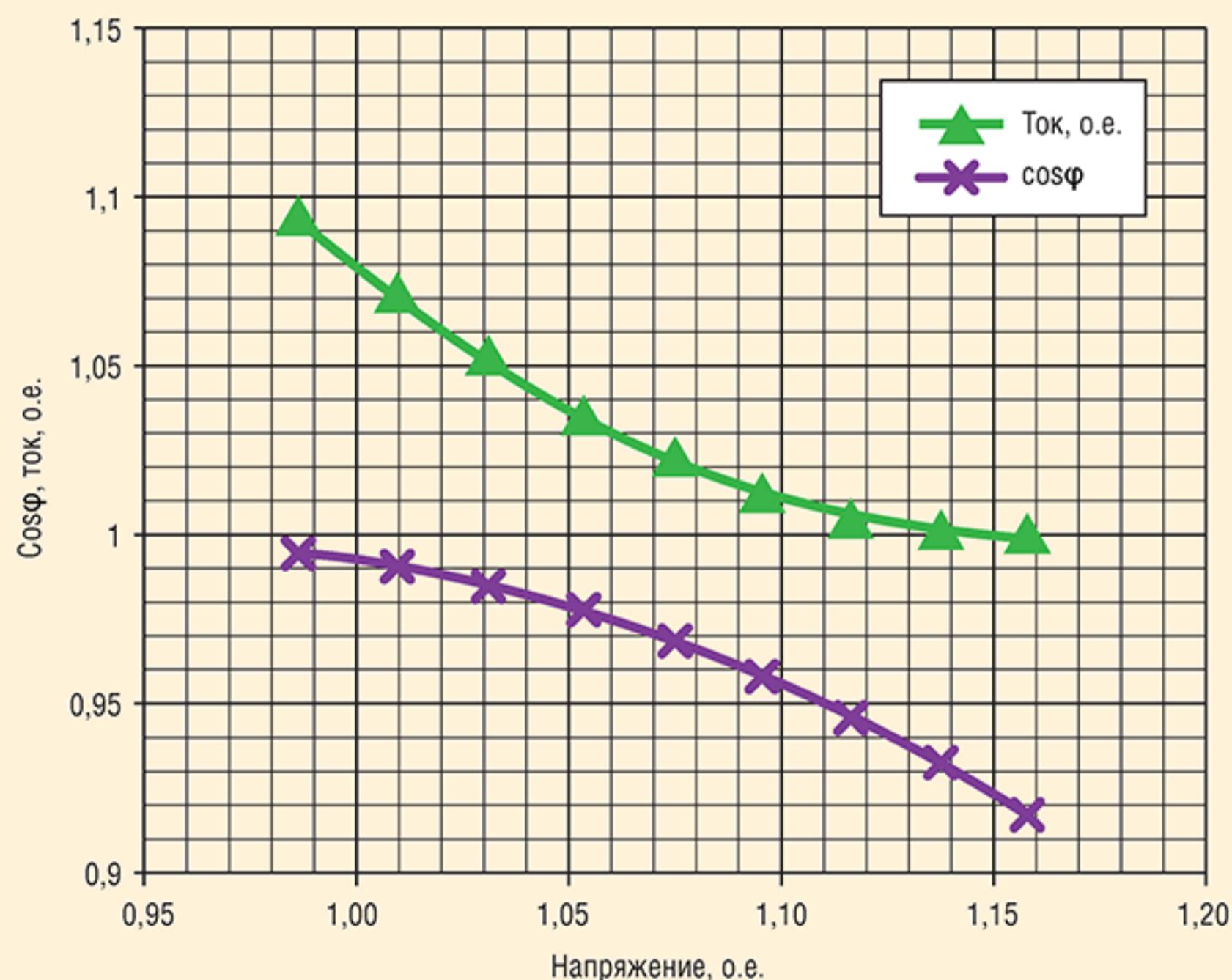
Согласно выражению (4) реализация режима 1 при одинаковом для обоих режимов первичном напряжении требует подключения двигателя к отпайке с более высоким напряжением.

Легко показать, что соотношение коэффициентов трансформации $k_{(1)}$ и $k_{(2)}$ будет подобно выражению (4):

$$k_{(1)} = k_{(2)} / (\cos\Theta_{(1)} \cdot \cos\Theta_{(2)}). \quad (6)$$

Потери во вторичной обмотке трансформатора при режимах 1 и 2 определяются выражениями:

Рис. 5. Зависимость тока и $\cos\phi$ от напряжения в относительных единицах



$$P_{2(1)} = I_{2(1)}^2 \cdot R_{2(1)} = Iq^2 \cdot \rho_m \cdot l_{cp} \cdot W_{2(1)} / s_{np2(1)}; \quad (7)$$

$$P_{2(2)} = I_{2(2)}^2 \cdot R_{2(2)} = (Iq / \cos\Theta_{(2)})^2 \cdot \rho_m \cdot l_{cp} \cdot W_{2(2)} / s_{np2(2)}, \quad (8)$$

где $I_{2(1)}$, $I_{2(2)}$, $R_{2(1)}$, $R_{2(2)}$, ρ_m , l_{cp} , $W_{2(1)}$, $W_{2(2)}$, $s_{np2(1)}$, $s_{np2(2)}$ – соответственно токи, активные сопротивления, удельное сопротивление меди, средняя длина витка, числа витков и средние площади сечения проводника вторичной обмотки трансформатора для двух режимов.

Учитывая, что

$$W_{2(1)} / W_{2(2)} = k_{(1)} / k_{(2)}, \quad (9)$$

соотношение между потерями во вторичной обмотке в режимах 1 и 2 имеет вид:

$$P_{2(1)} / P_{2(2)} = \cos\Theta_{(2)} / \cos\Theta_{(1)} \cdot s_{np2(2)} / s_{np2(1)}. \quad (10)$$

Оценка величины соотношения между потерями (10) для двигателей и трансформаторов разной мощности показала, что она во всех случаях близка к 1, поскольку $\cos\Theta_{(2)}$ меньше $\cos\Theta_{(1)}$, а $s_{np2(2)}$ больше $s_{np2(1)}$ примерно в том же соотношении. Для рассматриваемого примера она составляет 1,06, что позволяет, учитывая низкий уровень потерь в трансформаторе по сравнению с кабелем и двигателем, пренебречь разницей в потерях во вторичной обмотке без сколько-нибудь заметного ущерба для точности.

Учитывая, что токи в первичной обмотке трансформатора равны:

$$I_{1(1)} = Iq \cdot k_{(1)} = Iq \cdot k_{(2)} / (\cos\Theta_{(1)} \cdot \cos\Theta_{(2)});$$

$$I_{1(2)} = Iq \cdot k_{(2)} / \cos\Theta_{(2)},$$

а угол $\Theta_{(1)}$ равен углу $\Phi_{(1)}$, получим ожидаемое соотношение потерь в первичной обмотке трансформатора:

$$P_{1(1)} / P_{1(2)} = 1 / (\cos\Phi_{(1)})^2.$$

СТАНЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Потери в СУ можно в первом приближении принять пропорциональными току. Выходной ток СУ равен току первичной обмотки трансформатора, поэтому потери в СУ можно определить через ее КПД η_{cy} :

$$P_{cy(1)} = m \cdot U_1 \cdot I_{1(1)} \cdot (1 - \eta_{cy}) / \eta_{cy};$$

$$P_{cy(2)} = m \cdot U_1 \cdot I_{1(2)} \cdot (1 - \eta_{cy}) / \eta_{cy}.$$

Соотношение потерь при двух разных режимах будет иметь вид:

$$P_{\text{СУ}(1)}/P_{\text{СУ}(2)} = 1/\cos\varphi_{(1)}.$$

ПРИМЕР

Вентильный электродвигатель типа ПВЭДН100-117-3480-3,0 получает питание от СУ через повышающий трансформатор и кабель.

Параметры двигателя следующие:

$E_0 = 3153$ В, $X_C = 45$ Ом, $R = 5,94$ Ом (при температуре обмотки 115°C). Угол Θ в режиме 1 составляет $23,6$ эл. град., а в режиме 2 равен $34,0$ эл. град. Первая гармоника тока в режиме 1 составляет $18,8$ А, в режиме 2 – $22,6$ А.

В физических величинах потери P_M составляют 6460 Вт, P_M – 7400 Вт. Общие потери двигателя в режиме 1 составляют 7530 Вт, в режиме 2 – 9910 Вт. Разница в потерях составляет 2380 Вт. КПД двигателя в режиме 1 составляет 93% , в режиме 2 – $91,1\%$.

Параметры кабеля: сечение жилы 10 mm^2 , длина 2000 м, средняя температура кабеля принята равной 70°C . Активное сопротивление жилы кабеля R_K составляет $4,2$ Ом.

Для данного привода P_K – 4579 Вт, P_K – 6662 Вт, разница в потерях составляет 2083 Вт.

Параметры трансформатора. В примере использован трансформатор типа ТМПНГ160/3 производства Минского электротехнического завода им. В.И. Козлова. Активное сопротивление фазы первичной обмотки трансформатора составляет $0,006$ Ом.

КПД СУ принят равным 97% .

Результаты расчетов потерь в элементах сведены в таблице. Из таблицы следует, что режим минимального тока обеспечивает значительно лучшие энергетические показатели. КПД двигателя выше на $1,9\%$, КПД привода выше на $3,2\%$.

В данной работе не ставилась задача точного определения потерь в элементах электропривода, упор сделан на сравнительные характеристики двух режимов.

Следует отметить еще одно преимущество режима минимального тока: увеличенную перегрузочную способность. Действительно, максимальный момент двигателя в соответствующем режиме определяется выражением:

$$M_{\max(1)} = m \cdot U_{(1)} \cdot E_0 / \Omega_{\text{мех}} / X_C = m \cdot E_0^2 / \Omega_{\text{мех}} / X_C / \cos\varphi_{(1)};$$

$$M_{\max(2)} = m \cdot U_{(2)} \cdot E_0 / \Omega_{\text{мех}} / X_C = m \cdot E_0^2 \cdot \cos\varphi_{(2)} / \Omega_{\text{мех}} / X_C.$$

Откуда:

| Таблица | | |
|----------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Потери в элементах погружного электропривода | | |
| Параметр | Режим минимального тока (1) | Режим $\cos\varphi = 1$ (2) |
| Коэффициент мощности по первой гармонике | 0,89 | 1 |
| Потери в меди двигателя, Вт | 6460 | 7400 |
| Общие потери в двигателе, Вт | 7530 | 9910 |
| КПД двигателя, % | 93,0 | 91,1 |
| Потери в кабеле, Вт | 4579 | 6662 |
| Потери в меди первичной обмотки трансформатора, Вт | 761 | 697 |
| Потери в станции управления, Вт | 4089 | 3896 |
| КПД электропривода, % | 80,1 | 77,8 |

$$M_{\max(1)}/M_{\max(2)} = 1/(\cos\varphi_{(1)} \cdot \cos\varphi_{(2)}).$$

Для двигателя с рассматриваемыми параметрами перегрузочная способность в режиме минимального тока в 1,32 раза выше, чем в режиме $\cos\varphi = 1$. Это преимущество может оказаться, например, при подклинивании насоса.

На рис. 5 представлена зависимость тока и $\cos\varphi$ от напряжения. Напряжение u и ток l представлены в относительных единицах, причем $u = U/E_0$, а $l = I/I_q$.

Как видно из рис. 5, при уменьшении напряжения от значения, соответствующего минимальному току ($u = 1,16$), примерно на 6% величина тока меняется не более чем на 1% , в то время как величина $\cos\varphi$ меняется почти по линейному закону и ее изменение составляет примерно $4,5\%$.

Следовательно, в данном случае при установке напряжения достаточно взять его значение, равным 1,1 от ЭДС холостого хода (дается в ТУ).

Отметим, что значение коэффициента мощности, потребляемой двигателем, всегда несколько меньше величины $\cos\varphi$, поскольку форма выходного напряжения СУ и тока в двигателе несколько отличаются от синусоидальной за счет остаточных пульсаций на несущей частоте. Их измеренное эффективное значение больше эффективного значения первой гармоники.

Номинальная мощность элементов наземного оборудования (СУ и трансформатора) ранжируется с достаточно большим шагом. Например, в диапазоне мощностей 47–1000 кВА соотношение мощностей соседних типоразмеров для СУ производства ЗАО «Электон» и трансформаторов производства

«МЭТЗ» составляет в среднем примерно 1,4. Поэтому на скважинах в большинстве случаев есть возможность реализовать режим, близкий к режиму минимального тока.

Увеличенное значение КПД в режиме минимального тока позволяет либо снизить перегрев его обмотки, либо снять с него большую мощность. Действительно, потери P в номинальном режиме двигателя определяются выражением:

$$P = P_n * (1 - \eta) / \eta,$$

где P_n – мощность на валу двигателя.

Соотношение потерь при КПД 91,1 и 93% составит 1,3. Перегрев обмотки якоря вентильных двигателей с номинальной частотой вращения 3000 об/мин обусловлен прежде всего потерями в обмотке якоря, поэтому перегрев в режиме 1 меньше перегрева в режиме 2 на 25–30%. Если допустить, что потери в двигателе пропорциональны квадрату тока, можно либо снять с двигателя дополнительно около 14% его мощности, либо уменьшить на эту величину длину его активной части без нарушения его температурного режима.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Энергетические показатели погружного вентильного электропривода в режиме минимального тока выше примерно на 3%, а перегрузочная способность – примерно на 30% по сравнению с режимом $\cos\phi = 1$.
2. Установленная мощность наземного оборудования (трансформатора и СУ) в режиме минимального тока выше в $1/\cos\phi$ раза по сравнению с режимом $\cos\phi = 1$.
3. Перегрузочная способность вентильного двигателя в режиме минимального тока выше, чем в режиме $\cos\phi = 1$.
4. Перегрев обмотки якоря в режиме минимального тока на 25–30% меньше, чем при режиме $\cos\phi = 1$.
5. Реализация режима минимального тока позволяет либо снять с двигателя дополнительно около 14% его мощности, либо уменьшить на эту величину длину его активной части без нарушения его температурного режима.
6. Следует стремиться к реализации режима электропривода с вентильным двигателем, близкого к режиму минимального тока, кроме случаев, когда мощность наземного оборудования недостаточна. ♦

