

УДК 621.316

UDC 621.316

**ПУТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В НАСОСНЫХ
УСТАНОВКАХ СИСТЕМЫ МЕЛИОРАЦИИ И
ОРОШЕНИЯ**

**WAYS FOR ENERGY SAVING IN PUMPING
PLANTS FOR MELIORATION AND IRRIGA-
TION SYSTEMS**

Дидыч Виктор Александрович
аспирант

*Кубанский государственный аграрный универси-
тет, Краснодар, Россия*

Didych Victor Aleksandrovich
postgraduate student

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье представлены: вопросы экономии электроэнергетики, которые становятся все более актуальными в связи с постоянным повышением тарифов и введением закона об энергоэффективности и энергосбережении. Для экономии энергии на насосных установках все большее распространение получает регулируемый электропривод. Для адекватной регулировки технологическим процессом перемещения воды и электроснабжением получены соответствующие аналитические зависимости. Анализ целевой функции оптимизации и КПД отдельных элементов, а также общего КПД системы, позволил найти оптимальные параметры системы и определить энергосберегающие режимы работы

Problems concerning energy saving become more urgent in the connection with permanent increasing of electricity price and enactment of the law regarding energy efficiency and energy saving. Regulated electric drive has been using widely for energy saving within pumping plant. Appropriate equations were carried out for adequate regulation of technology process of water travel and energy supplying. The analysis of criterion function for optimization and efficiency factor for specific elements as well as whole system makes it possible to find out the optimal system parameters and define energy saving work conditions

Ключевые слова: ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, НАСОСНЫЙ АГРЕГАТ, МАГИСТРАЛЬ, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, УПРАВЛЕНИЕ

Keywords: ENERGY SAVING, PUMPING UNIT, WATER MAIN, ELECTRIC MOTOR, CONTROL

Вопросы экономии электроэнергии становятся все более актуальными в связи с постоянным повышением тарифов и введением закона об энергоэффективности и энергосбережении. Статистические данные Краснодарского края говорят, что значительная часть расходов на мелиорацию это затраты на эксплуатацию насосных станций. Опыт эксплуатации такого вида установок показывает, что в каждом кубическом метре перекаченной воды 74% расходов приходится на электроэнергию. Одна из основных проблем сбросных насосных станций – неудовлетворительное состояние систем управления насосными агрегатами. Зачастую они находятся в неработоспособном состоянии либо работают неэффективно. Это обуславливается тем, что они были созданы еще в период строительства насосных станций и сейчас сильно устарели. Так в насосных агрегатах ОПВ-145Э, часто используемых на оросительных и сбросных насосных станциях существует система регулирования производительности путем изменения

угла разворота лопастей рабочего колеса. Данная система управления сложна в эксплуатации и крайне ненадёжна, а многие её элементы сняты с производства десятки лет назад.

Для экономии энергии на насосных установках все большее распространение получает регулируемый электропривод. Опыт применения такого электропривода показал, что в одних случаях его установка привела к существенной экономии энергии, в других – она незначительна. Теоретические исследования и многолетние данные по применению регулируемого привода в системах водоснабжения показывают, что в основном экономия энергии составляет от 8 до 12%, а иногда может достигать 20-25% [1]. Установка регулируемого электропривода на насосных установках оросительных систем и водоотводящих объектах требует значительных инвестиций, поэтому целесообразность и эффективность проведения таких модернизаций должны иметь научное и технико-экономическое обоснование.

Применение управления режимом работы электропривода не всегда приводит к равенству фактических напоров в системе напорам, которые соответствуют кривым равного значения КПД (кривым подобных режимов). Для адекватной регулировки технологическим процессом перемещения воды и электроснабжением должны быть получены соответствующие аналитические зависимости. Анализ энергопотребления насосным агрегатом лучше проводить путем исследования энергетической диаграммы (рис.1). В соответствии с энергетической диаграммой (рис.1) при передаче энергии от электрической сети к жидкости, движущейся к потребителям происходят потери в четырех основных элементах: преобразователе частоты $\Delta P_{пч}$, электродвигателе $\Delta P_{дв}$, турбомеханизме $\Delta P_{тм}$, магистрали $\Delta P_{м}$. Энергоэффективность такой системы можно оценить по такому показателю как коэффициент полезного действия (КПД). В каждом элементе данной системы КПД зависит от многих параметров, которые следует изучить

и оценить их влияние на значение этого показателя. Так КПД преобразователя частоты $\eta_{пч}$ будет зависеть от конструктивных параметров k_n , частоты тока на выходе f , нагрузке, создаваемой электродвигателем I ($\eta_{пч} = f(k_n, f, I)$). В свою очередь КПД электродвигателя зависит от параметров самой электрической машины (сопротивлений обмоток, схемы обмотки статора, характеристик стали магнитопровода и т.д.) R_m ; нагрузки, создаваемой насосом I ; частоты тока, подаваемой на обмотку статора f ($\eta_{эд} = f(R_m, f, I)$). Что касается турбомеханизма, то на его КПД будет оказывать влияние частота вращения рабочего вала n , угол разворота лопастей α , производительность Q и напор H ($\eta_{тм} = f(n; Q; H; \alpha)$); от характеристики магистрали - производительность Q_m , статический напор $H_{ст}$ и скоростной напор H_v - будет зависеть ее КПД ($\eta_m = f(Q_m; H_{ст}; H_v)$).

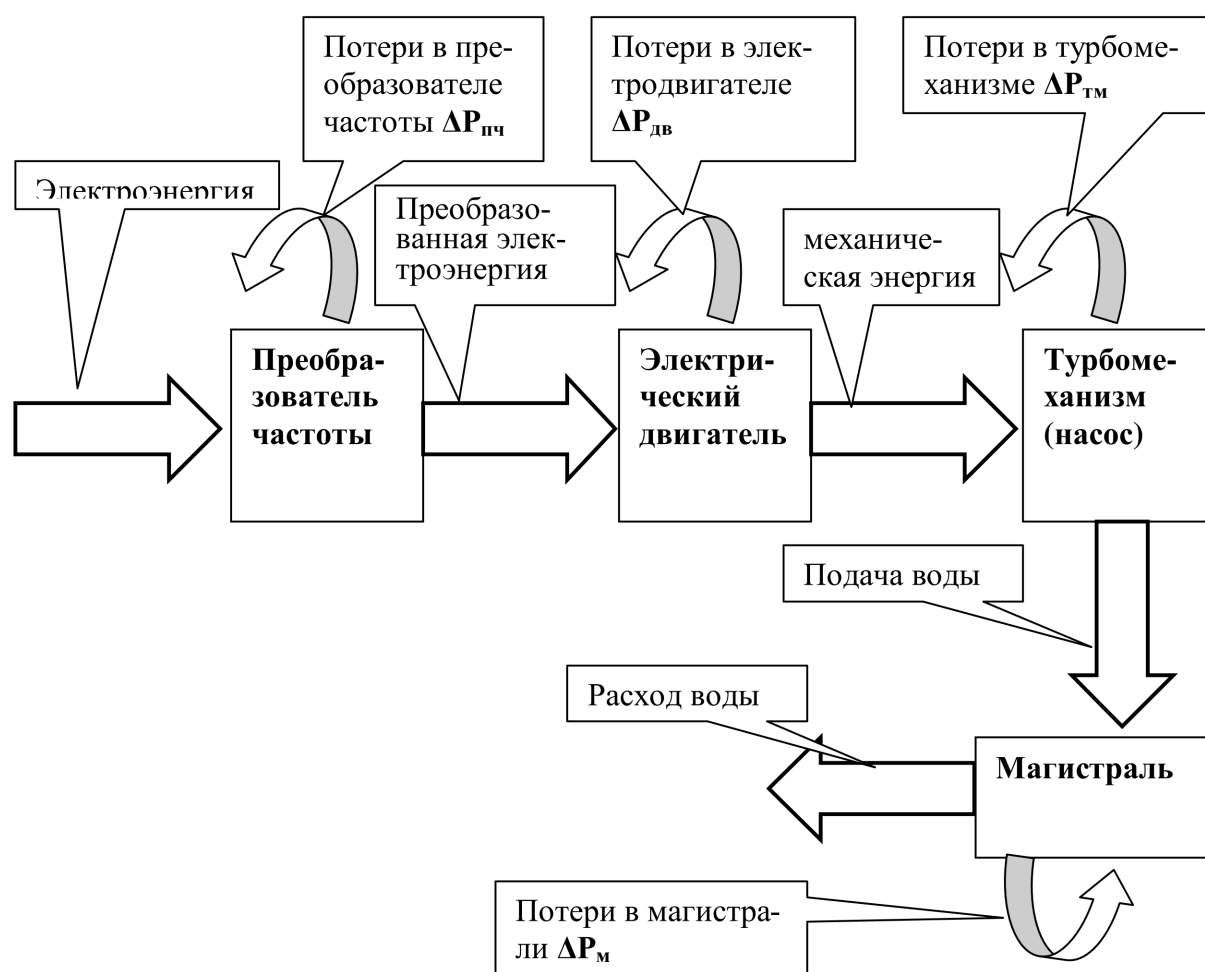


Рисунок 1. – Энергетическая диаграмма насосного агрегата

Анализ КПД отдельных элементов и общего КПД системы позволит найти оптимальные параметры системы и определить энергосберегающие режимы работы:

$$\begin{cases} \eta_{nc} = f(k_n; f; I) \\ \eta_{\varepsilon d} = f(R_m; f; I) \\ \eta_{TM} = f(n; Q; H; \alpha) \\ \eta_M = f(Q_m; H_{cm}; H_v) \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, через общий КПД агрегата можно выразить целевую функцию оптимизации:

$$\eta_{ag} = \eta_{nc} \cdot \eta_{\varepsilon d} \cdot \eta_{TM} \cdot \eta_M \Rightarrow \max \quad (2)$$

Для того, чтобы получить максимум КПД агрегата необходимо исследовать энергетические показатели отдельных составляющих рассматриваемой системы.

Важной составной частью электропривода насосного агрегата является преобразователь частоты тока. При работе с электродвигателем у него также наблюдаются потери энергии, которые связаны с электрической нагрузкой и выходной частотой тока. Величина этих потерь зависит от конструкции преобразователя, комплектующих элементов, схемного решения. Однако, основные потери энергии связаны с нагрузкой и частотой тока [3]. Анализ этих графиков показывает, что при работе преобразователя до нагрузки не ниже 25% от номинальной, КПД преобразователя частоты практически сохраняется постоянным. Наиболее существенное влияние на КПД устройства оказывает изменение частоты тока. В этом случае, необходимо учитывать, что при уменьшении частоты тока будет уменьшаться и нагрузка на преобразователь частоты (в соответствии с законом регулирования для насосных агрегатов). В результате исследований были получены графики зависимости КПД устройства от относительного изменения частоты тока ($f_i / f_n = f^*$), с учетом изменения нагрузки (связано с зако-

ном регулирования для данного механизма) и аппроксимированы соответствующими кривыми. В дальнейшем анализе можно использовать следующую формулу для определения КПД преобразователя частоты:

$$\eta_{нч} = -0,76(f^*)^2 + 1,326f^* + 0,383. \quad (3)$$

Насосные агрегаты перекачивающих станций системы водоотведения и орошения обычно снабжены асинхронными электродвигателями повышенного напряжения. В связи с этим необходимо исследовать энергетические показатели именно асинхронных машин. Анализ энергопотребления можно вести на основе схемы замещения асинхронного электродвигателя и упрощенной векторной диаграммы, что дает возможность получить выражение для коэффициента полезного действия электродвигателя:

$$\eta_{эд} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{1 - s}{1 + \frac{r_2 (r_1 + r_0)}{r_0^2 \cdot s} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s}{r_2} + \frac{r_2 \cdot r_1}{x_0^2 \cdot s}}. \quad (4)$$

Как видно из формулы (4) КПД электродвигателя зависит от сопротивлений обмоток статора и ротора, а также от скольжения и частоты тока питающей сети. В качестве примера были построены графики зависимости КПД от скольжения и частоты для электродвигателя АВ-16. Из полученных графиков сделан вывод, что уменьшение частоты тока менее 20 Гц резко уменьшает КПД электрической машины, следовательно, данная частота является минимальной для регулировки. Также наблюдается большая зависимость КПД от скольжения. Оптимальный режим работы с максимальным КПД данного электродвигателя наблюдается при частоте тока от 45 Гц до 90 Гц и скольжении от 0,016 до 0,023. Полученные характеристики необходимо использовать при программировании частотного преобразователя со скалярным управлением.

В системах водоснабжения подача насосов является неуправляемым параметром. С помощью регулируемого электропривода добиваются регулирования давления в трубопроводных системах. Независимо от способа управления, снижение избыточные напоров при сохранении подачи, приводит к нарушению одного из двух, приведенных выше условий подобия, что ведет к снижению КПД насоса. О непостоянстве КПД насоса вдоль кривых подобных режимов свидетельствуют эллипсоидные концентрические формы КПД постоянного уровня, приводимые на универсальных характеристиках насосов. Так, например, для насоса ОПВ-145Э и двигателя АВ-16 с преобразователем частоты Mitsubishi Electric FR-A540L-G800K был получен ряд регулировочных QH – характеристик и выделена область оптимальных значений КПД (рис.2.). В результате анализа, приведенного в [1], было установлено, что зависимость снижения КПД насоса от своего максимального значения при отклонении текущей частоты от номинальной является нелинейной и в значительной мере определяется глубинный диапазона регулирования $n_{тек}/n_{ном}$. Исследования [2] также подтверждают изменение КПД насоса при регулировании.

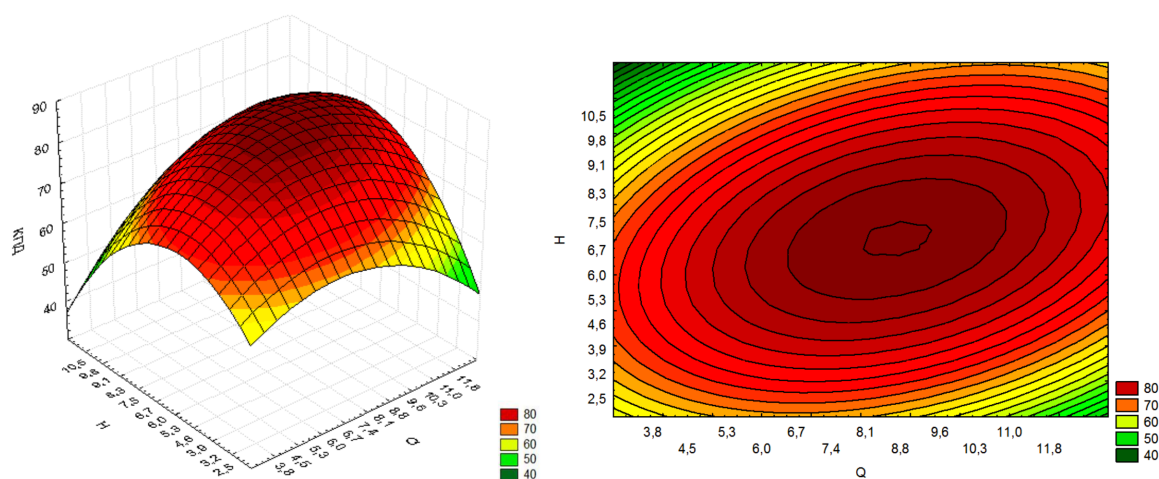


Рисунок 2. - Область оптимальных значений КПД для насоса ОПВ-145Э и двигателя АВ-16 с преобразователем частоты Mitsubishi Electric FR-A540L-G800K

В соответствии с аппроксимированными выражениями нами получена следующая формула для определения КПД насоса типа ОПВ при изменении угла разворота лопастей и частоты тока:

$$\eta = \eta_{\max} \left\{ 0,449 [\alpha^* (1,25 f^* - 0,25)]^4 - 1,71 [\alpha^* (1,25 f^* - 0,25)]^3 + \right. \\ \left. + 2,101 [\alpha^* (1,25 f^* - 0,25)]^2 - 0,881 \alpha^* (1,25 f^* - 0,25) + 1,034 \right\} \times \\ \times [-5,27 (q^*)^3 + 11,72 (q^*)^2 - 7,9 q^* + 2,45] \quad (5)$$

где α^* - относительное изменение угла разворота лопастей, $\alpha^* = \frac{\Delta\alpha + \alpha}{\Delta\alpha}$,

$\Delta\alpha$ - возможный диапазон изменения угла разворота; $q^* = \frac{Q}{Q_{opt}}$ - относительные изменения текущей производительности насоса к ее оптимальному значению.

При транспортировании воды по магистрали также возникают потери энергии, связанные с скоростным напором и преодолением статического напора. Выражение для КПД трубопроводной магистрали было получено в [3] и имеет вид:

$$\eta_m = \frac{k_v \cdot (q^*)^2 + H_{cm}^*}{k_m \cdot (q^*)^2 + H_{cm}^*}, \quad (6)$$

где k_v - коэффициент скоростного напора, можно принимать от 0,01 до 0,03; k_m - коэффициент напорной характеристики магистрали, вычисляется из графика относительных QH- характеристик - $k_m = 1 - H_{cm}^*$; H_{cm}^* - величина относительного статического напора. При изменении статического напора переход на искусственные характеристики производится изменением угла разворота лопастей или частотой тока электродвигателя. На основании изложенного формула для определения КПД магистрали принимает вид:

$$\eta_m = \frac{k_v \cdot [\alpha^* (1,25 f^* - 0,25)]^2 + H_{cm}^*}{(1 - H_{cm}^*) [\alpha^* (1,25 f^* - 0,25)]^2 + H_{cm}^*}. \quad (7)$$

КПД магистрали при уменьшении угла разворота (также и частоты тока) увеличивается. При этом большое значение имеет величина статического напора – при малом его значении зависимость более ярко выражена.

Проанализируем математическую модель агрегата первоначально без учета КПД магистрали. На основе полученных отдельных зависимостей КПД от параметров составляющих элементов можно представить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \eta_{nc} = -0,76(f^*)^2 + 1,326f^* + 0,383 \\ \eta_{\partial} = \frac{1-s}{1 + \frac{r_2(r_1+r_0)}{r_0^2 \cdot s} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s}{r_2} + \frac{r_2 \cdot r_1}{x_0^2 \cdot s}} \\ \eta_{TM} = \eta_{\max} \left\{ 0,449[\alpha^*(1,25f^* - 0,25)]^4 - 1,71[\alpha^*(1,25f^* - 0,25)]^3 + \right. \\ \left. + 2,101[\alpha^*(1,25f^* - 0,25)]^2 - 0,881\alpha^*(1,25f^* - 0,25) + 1,034 \right\} \times \\ \times [-5,27(q^*)^3 + 11,72(q^*)^2 - 7,9q^* + 2,45] \end{cases} \cdot (8)$$

Введем обозначения в выражении турбомеханизма: зависимость в фигурной скобке - A_q ; в квадратной скобке второго сомножителя - B_q . Подставим полученные выражения в целевую функцию (2) без магистрали и получим:

$$\begin{aligned} \eta_{ag} &= \eta_{nc} \cdot \eta_{\partial} \cdot \eta_{TM} = \\ &= \frac{[-0,76(f^*)^2 + 1,326f^* + 0,383] \cdot (1-s) \cdot [\eta_{\max} A_{qf} \cdot B_q]}{1 + \frac{r_2(r_1+r_0)}{r_0^2 \cdot s} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s}{r_2} + \frac{r_2 \cdot r_1}{x_0^2 \cdot s}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Выразим индуктивное сопротивление x_0 через индуктивность и относительное значение частоты тока, а относительное изменение частоты вращения заменим на относительную частоту тока:

$$\eta_{az} = \frac{[-0,76(f^*)^2 + 1,326f^* + 0,383] \cdot (1-s) \cdot [\eta_{\max} A_{\alpha f} \cdot B_q]}{1 + \frac{r_2 (r_1 + r_0)}{r_0^2 \cdot s} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s}{r_2} + \frac{r_2 \cdot r_1}{4\pi^2 \cdot (f^*)^2 \cdot f_n^2 \cdot L^2 \cdot s}}. \quad (10)$$

При подстановке данных электродвигателя АВ-16, были получены графики зависимости КПД агрегата от изменения частоты тока при различном скольжении и относительной производительности (рис. 3). Также получены графики отдельных КПД по элементам рассматриваемой системы (рис.4).

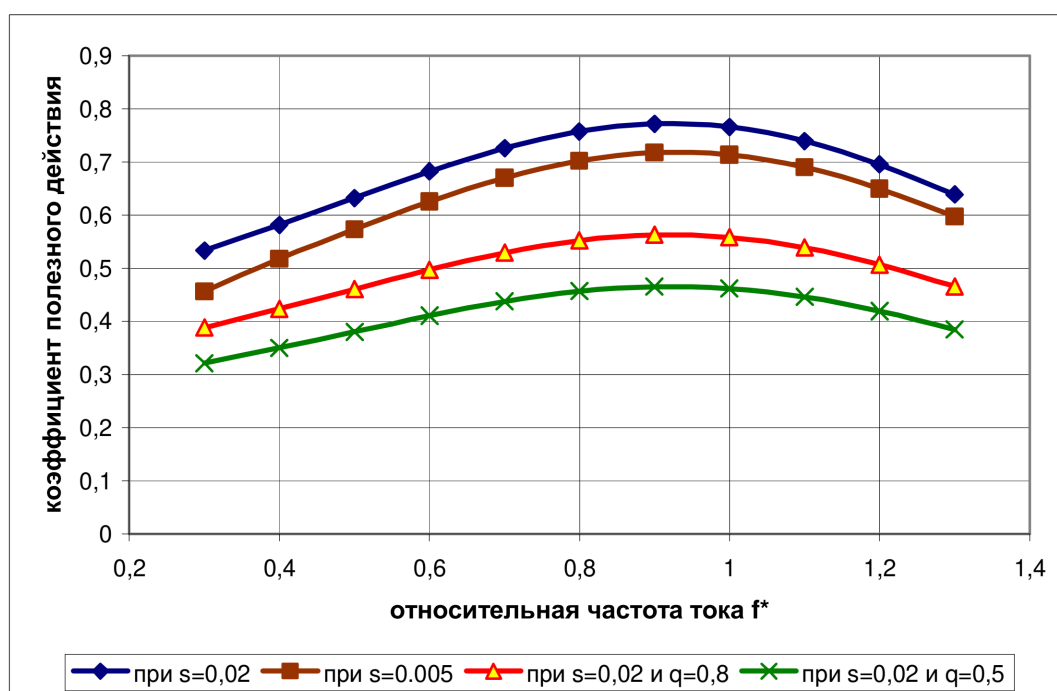


Рисунок 3.- Зависимости КПД агрегата от частоты тока при различном скольжении

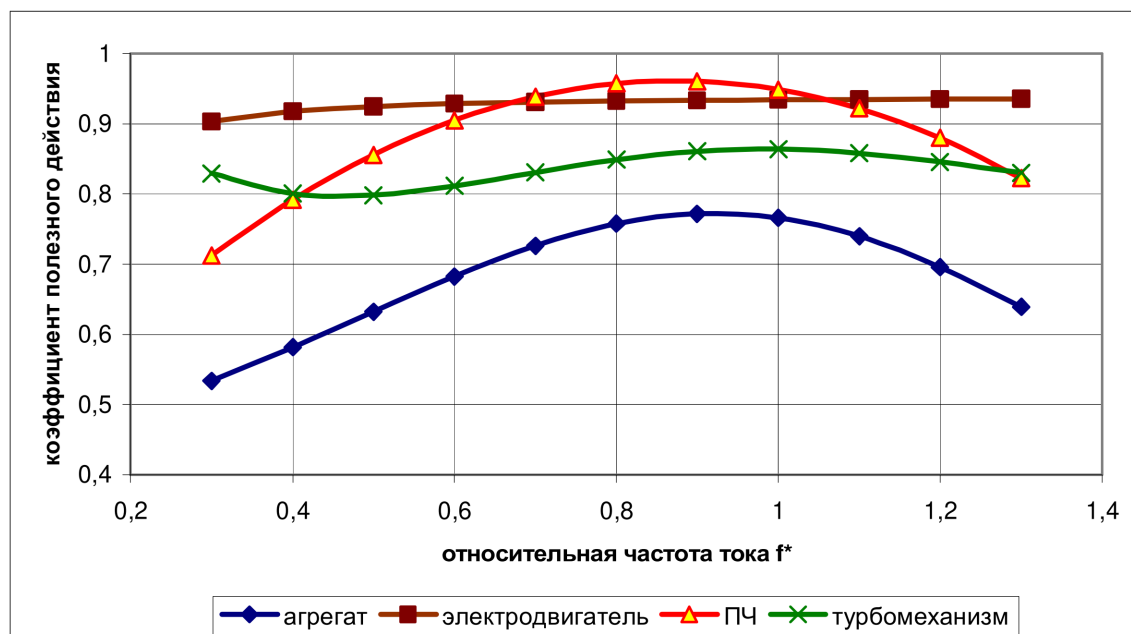


Рисунок 4. - Зависимости отдельных КПД агрегата от частоты

Как видно из графиков (рис.4) до относительной частоты тока равной 0,4 - КПД электродвигателя изменяется не значительно, но далее резко падает. Следовательно, не рекомендуется изменение частоты тока менее 20 Гц.

Второй способ регулирования – изменение угла разворота лопастей. В этом случае за счет угла разворота будет изменяться производительность при постоянной скорости вращения насоса. Необходимо определить - как изменится скольжение электродвигателя при данном способе регулировки. Известно, что момент сопротивления насоса выражается следующим образом:

$$M = \frac{Q \cdot H}{\eta_{mm} \cdot \omega} \quad (11)$$

В свою очередь $H \equiv Q^2$, тогда при постоянной скорости относительное значение момента будет равно кубу относительного значения производительности: $M^* = (q^*)^3$. Момент электродвигателя пропорционален скольжению, следовательно, формулу (10) можно представить в виде:

$$\eta_{az} = \frac{[-0,76(f^*)^2 + 1,326f^* + 0,383] \cdot (1 - s_n q^{*3}) \cdot [\eta_{\max} A_{\text{ог}} \cdot B_q]}{1 + \frac{r_2 (r_1 + r_0)}{r_0^2 \cdot s_n q^{*3}} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s_n q^{*3}}{r_2} + \frac{r_2 \cdot r_1}{4\pi^2 \cdot (f^*)^2 \cdot f_n^2 \cdot L^2 \cdot s_n q^{*3}}}. \quad (12)$$

Были построены графики зависимостей КПД агрегата от относительной производительности при разных углах разворота (рис.5). Также получены графики отдельных КПД элементов системы (рис.6).

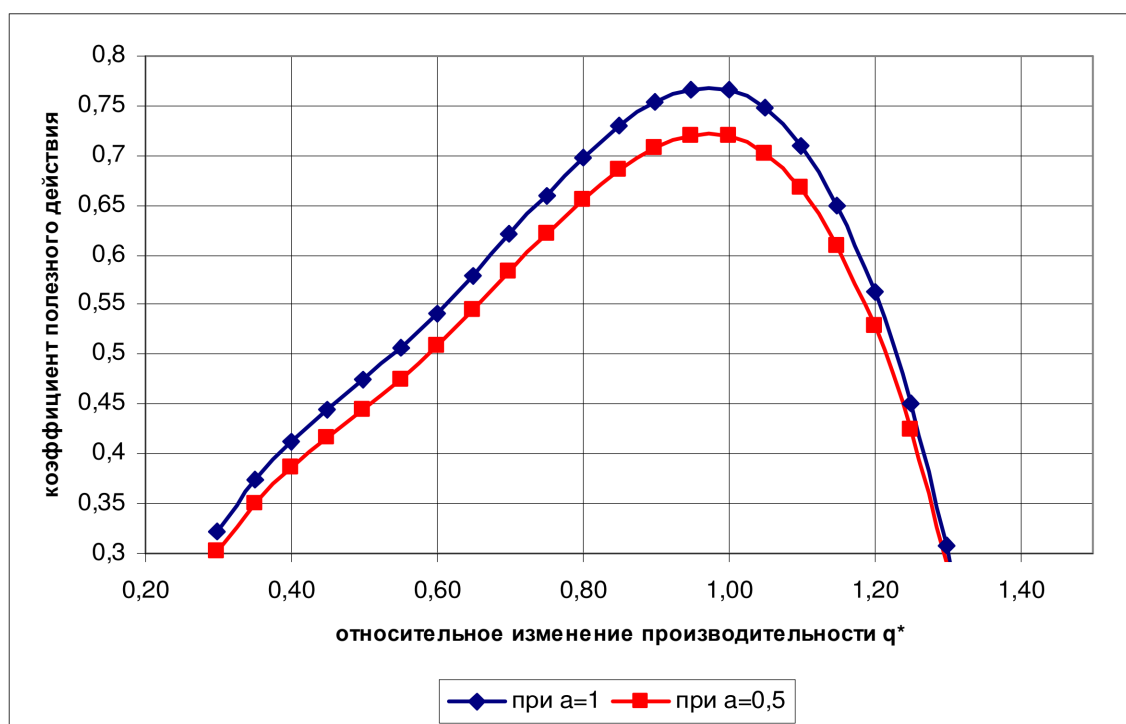


Рисунок 5- Зависимости КПД агрегата от относительной производительности

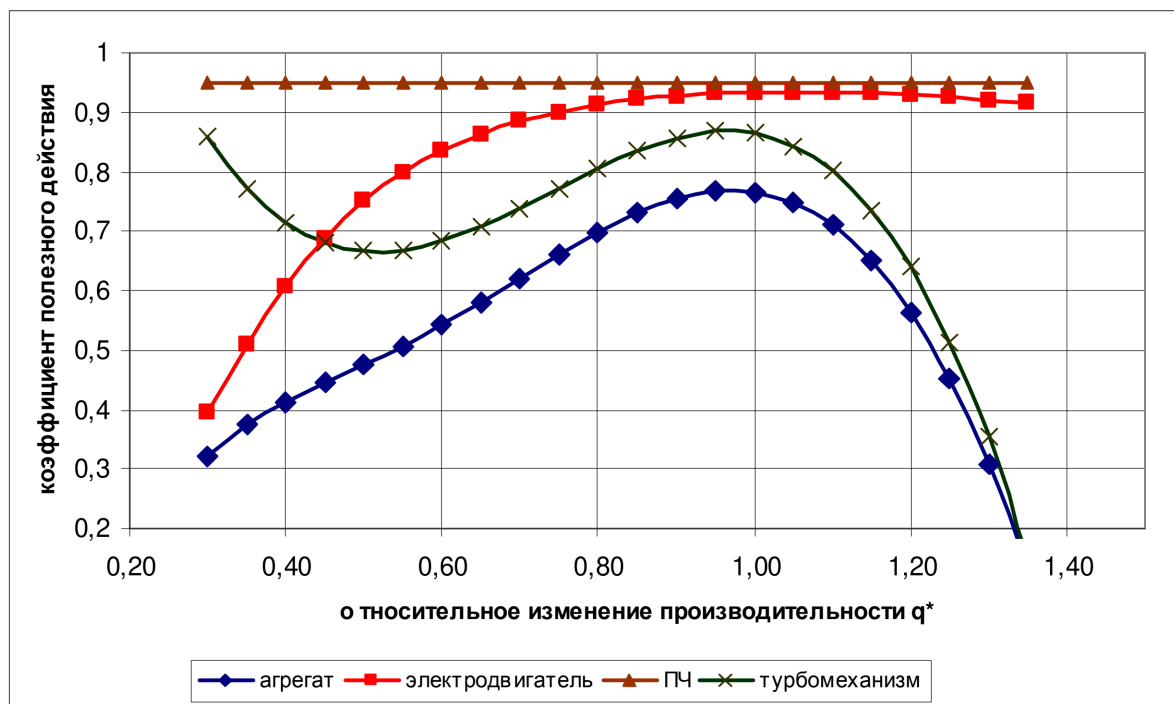


Рисунок 6 - Зависимости отдельных КПД агрегата от относительной производительности

Рисунок 6 показывает, что максимум всех КПД лежат в интервале по относительной производительности от 0,8 до 1,2.

Произведем анализ КПД агрегата с учетом КПД магистрали. На основе полученных ранее уравнений запишем систему уравнений для насосного агрегата:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{nc} = -0,76(f^*)^2 + 1,326f^* + 0,383 \\ \eta_{\partial\partial} = \frac{1-s}{1 + \frac{r_2(r_1+r_0)}{r_0^2 \cdot s} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s}{r_2} + \frac{r_2 \cdot r_1}{x_0^2 \cdot s}} \\ \eta_{TM} = \eta_{\max} \left\{ 0,449[\alpha^*(1,25f^* - 0,25)]^4 - 1,71[\alpha^*(1,25f^* - 0,25)]^3 + \right. \\ \left. + 2,101[\alpha^*(1,25f^* - 0,25)]^2 - 0,881\alpha^*(1,25f^* - 0,25) + 1,034 \right\} \times \\ \times [-5,27(q^*)^3 + 11,72(q^*)^2 - 7,9q^* + 2,45] \\ \eta_m = \frac{k_v \cdot [\alpha^*(1,25f^* - 0,25)]^2 + H_{cm}^*}{(1 - H_{cm}^*)[\alpha^*(1,25f^* - 0,25)]^2 + H_{cm}^*} \end{array} \right. \quad (13)$$

С учетом принятых обозначений КПД агрегата можно выразить следующей функцией:

$$\eta_{az} = \frac{\left\{ -0,76(f^*)^2 + 1,326f^* + 0,383 \right\} (1-s) \cdot [\eta_{\max} A_{gf} \cdot B_q] \cdot \left\{ k_v \cdot [\alpha^* (1,25f^* - 0,25)]^2 + H_{cm}^* \right\}}{\left[1 + \frac{r_2' (r_1 + r_0)}{r_0^2 \cdot s} - \frac{2 \cdot r_1}{r_0} + \frac{r_1 \cdot s}{r_2'} + \frac{r_2' \cdot r_1}{4\pi^2 \cdot (f^*)^2 \cdot f_n^2 \cdot L^2 \cdot s} \right] \cdot \left\{ (1-H_{cm}^*) [\alpha^* (1,25f^* - 0,25)]^2 + H_{cm}^* \right\}} \quad (14)$$

При подстановке данных электродвигателя АВ-16 получены графики зависимости КПД агрегата от изменения частоты тока при различном значении статического напора (рис. 7). Также получены графики отдельных КПД по элементам рассматриваемой системы (рис.8). Из рисунка 7 видно, что при уменьшении статического напора вид характеристик изменяется: при относительном статическом напоре менее 0,5 уменьшение частоты приводит к увеличению КПД агрегата; при относительном статическом напоре более 0,5 уменьшение частоты тока практически приводит к уменьшению КПД агрегата. На рисунках 9- 12 приведены поверхности и соответствующие сечения зависимостей КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей при различных значениях относительного статического напора.

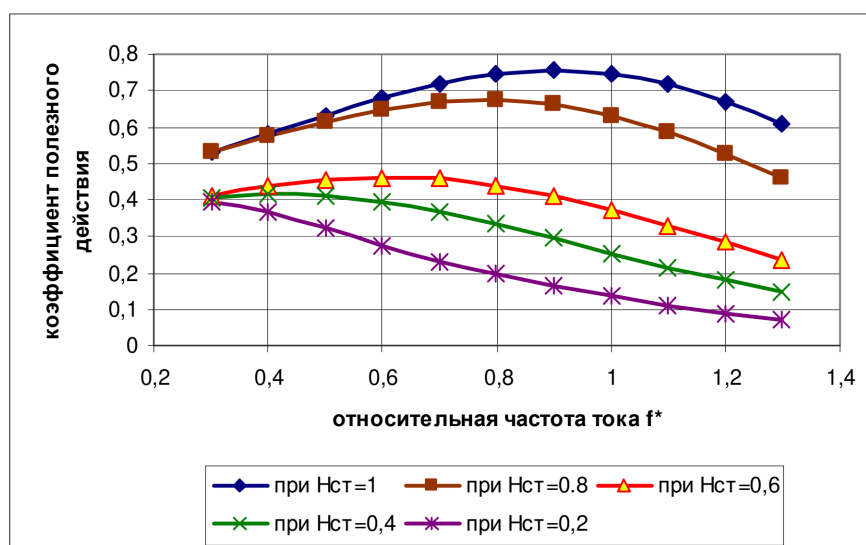


Рисунок 7 - Зависимости КПД агрегата от относительной частоты тока при разном значении относительного статического напора

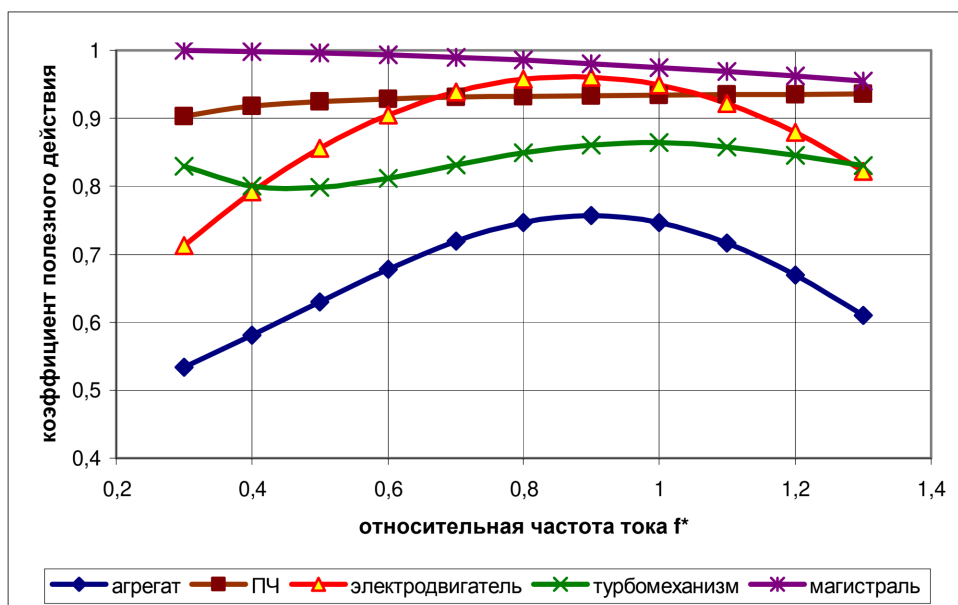


Рисунок 8 - Зависимости отдельных КПД агрегата от частоты при относительном статическом напоре равном 0,95

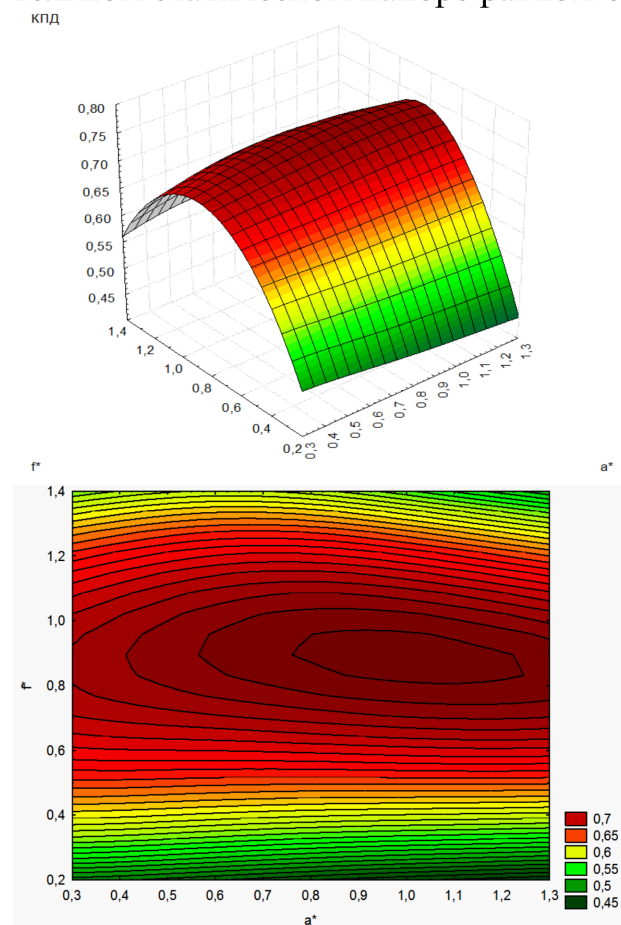


Рисунок 9 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей при $H_{ст}^* = 0,95$

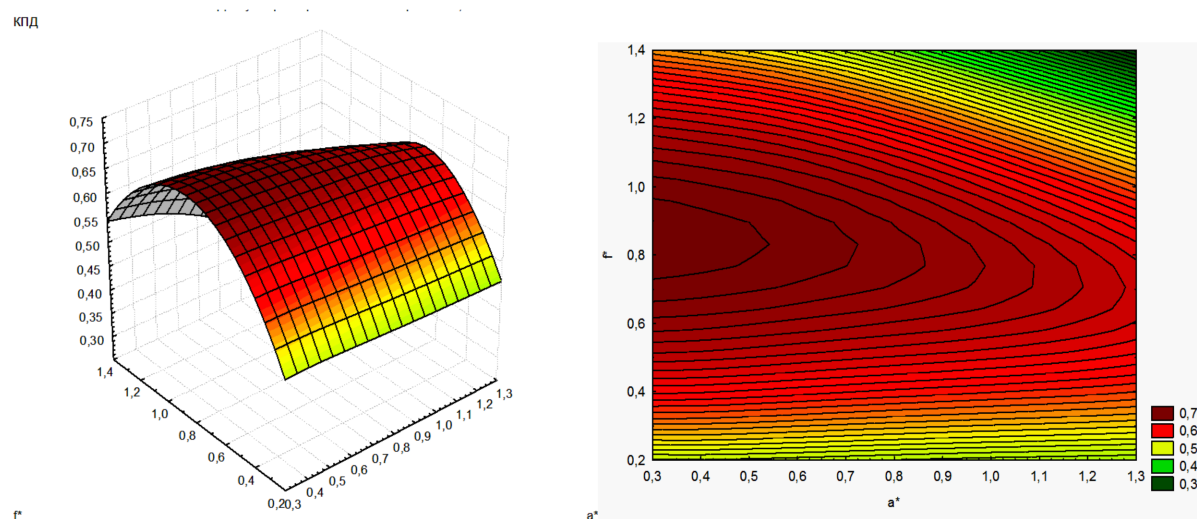


Рисунок 10 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей при $H_{ст}^* = 0,8$

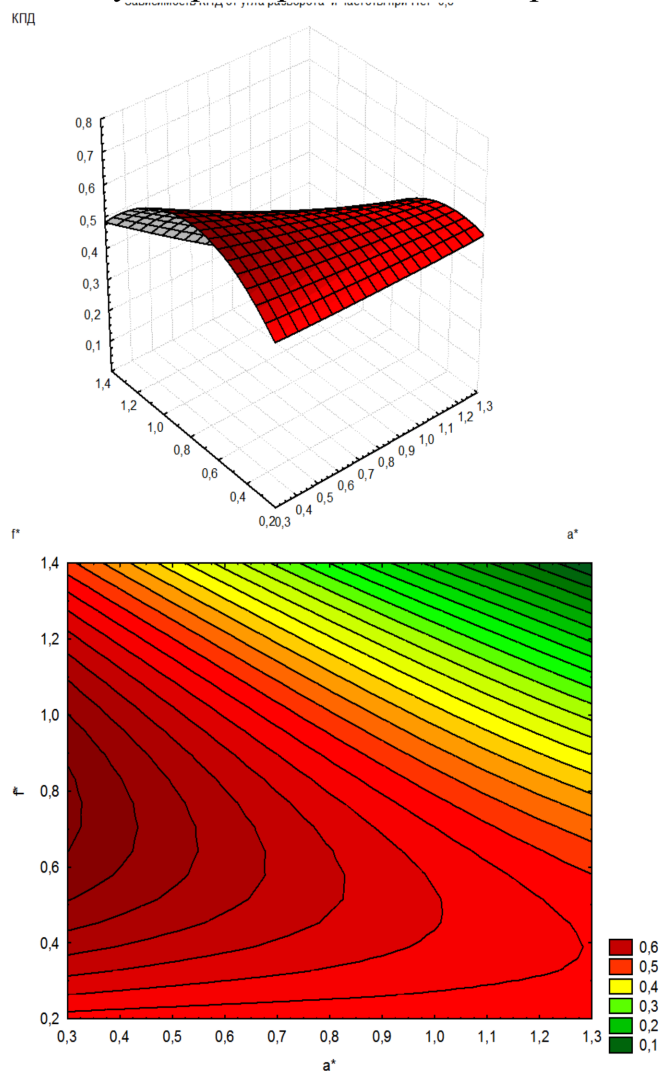


Рисунок 11 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей при $H_{ст}^* = 0,5$

КПД

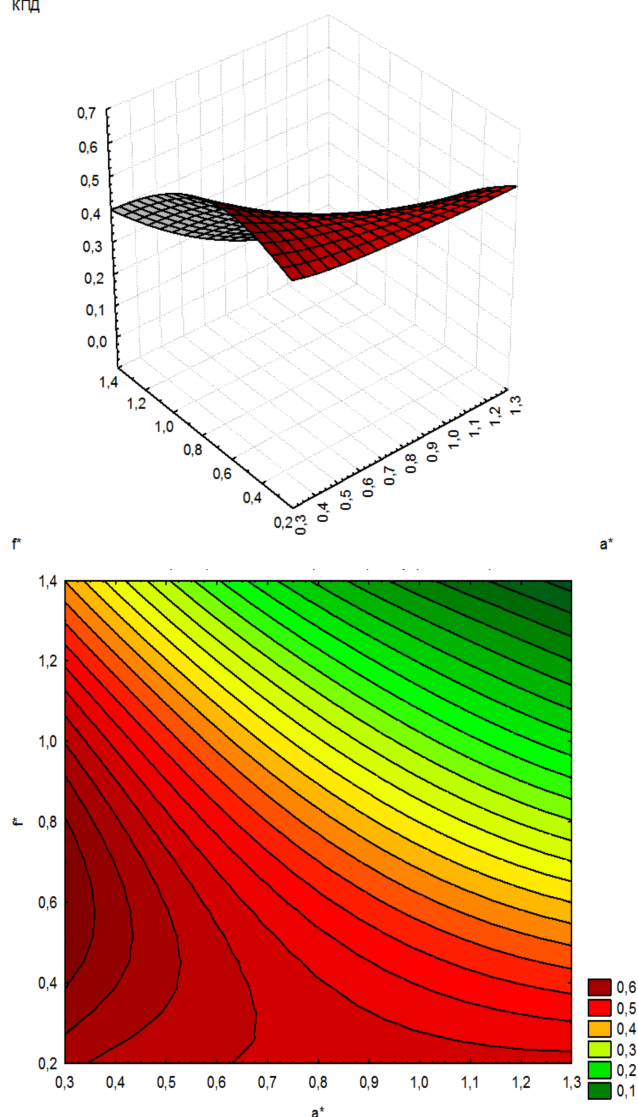


Рисунок 12 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей при $H_{ст}^* = 0,3$

На основе анализа рисунков 9 - 12 можно сделать следующее заключение об оптимальных режимах работы при различных статических напорах (Таблица 1). Такие оптимальные режимы можно создать только при векторном управлении частотного преобразователя и наличии устройства разворота лопастей. Если изменять угол разворота лопастей и применять частотный преобразователь со скалярным управлением, то можно получить также соответствующие графики (рис.13-14).

Таблица 1. – Значение оптимальных параметров агрегата при изменении относительного статического напора

Относительные значения оптимальных параметров	Относительное значение статического напора, $H_{ст}^*$ (уровень возможного КПД агрегата)			
	0,95 (0,75)	0,8 (0,75)	0,5 (0,6)	0,3 (0,6)
Угол разворота лопастей, α^*	0,8 - 1,25	0,3 - 0,55	0,3 - 0,35	0,3 - 0,35
Частота тока, f^*	0,85 - 0,93	0,75 - 0,95	0,65 - 0,85	0,4 - 0,8

Все зависимости получены с учетом влияния угла разворота на нагрузку электродвигателя и его скольжения. График, изображенный на рисунке 13, построен для статического напора равного 0,95. На этом графике видно, что при уменьшении угла разворота уменьшается КПД турбомеханизма и электродвигателя, а КПД магистрали – растет. Очевидно, что при уменьшении статического напора влияние КПД магистрали становится более заметным и это может привести к постоянству КПД агрегата при изменении относительного значения угла разворота. Также можно построить поверхности и соответствующие сечения зависимостей КПД агрегата от частоты тока и угла разворота лопастей при различных значениях относительного статического напора (рис.15 -18). На основе анализа рисунков 15-18 также можно получить оптимальные режимы работы при различных статических напорах с определенным уровнем КПД агрегата (Таблица 2.). Из таблицы 2 видно, что режимы при относительном статическом напоре равном 0,5 и 0,3 трудно создать реально – низкие частота тока, большие углы разворота. При реальных режимах значения КПД агрегата получаются гораздо ниже.

Таблица 2. – Значение оптимальных параметров агрегата при изменении относительного статического напора

Относительные значения оптимальных параметров	Относительное значение статического напора, $H_{ст}^*$ (уровень возможного КПД агрегата)			
	0,95 (0,74)	0,8 (0,68)	0,5 (0,65)	0,3 (0,6)
Угол разворота лопастей, α^*	0,8 – 1,2	0,45 – 0,85	0,8 – 1,1	0,2 – 0,25
Частота тока, f^*	0,85 – 1,0	0,8 – 1,0	0,2 – 0,3	0,85 – 1,1

Таким образом при скалярном управлении в частотном преобразователе эффект от изменения закона управления будет не заметен только до статического напора равного 0,5. При больших колебаниях статического напора лучше применять векторное управление. Из приведенных рисунков и их анализа видна эффективность комбинированного способа регулирования и особенно с использованием векторного управления преобразователя частоты тока.

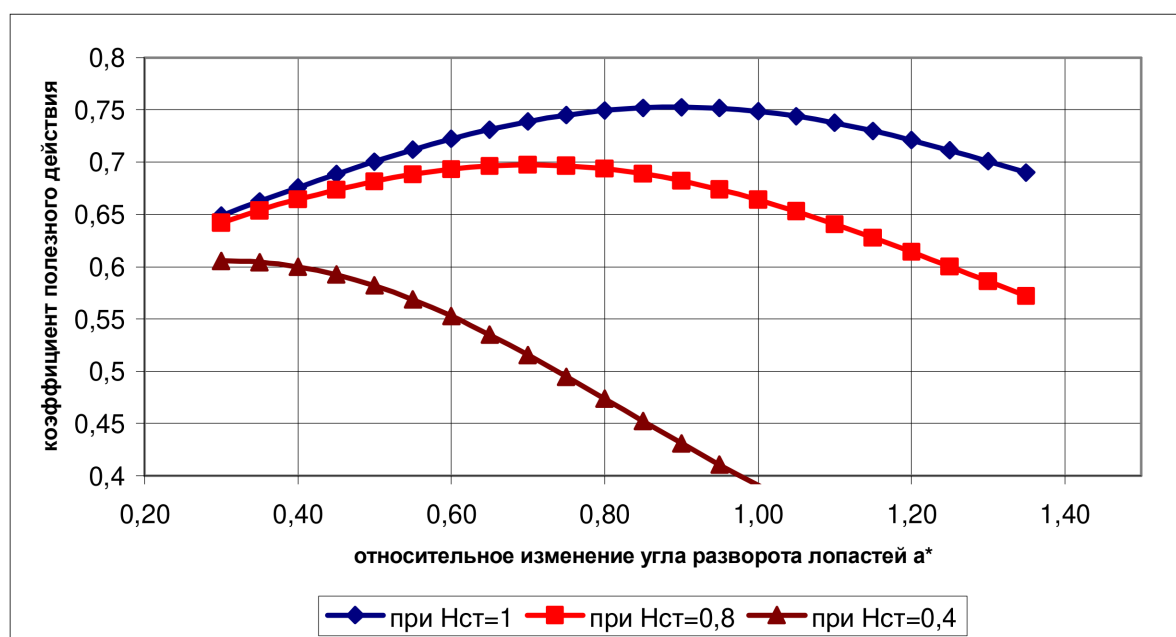


Рисунок 13- Зависимости КПД агрегата от относительного угла разворота лопастей при разном значении относительного статического напора

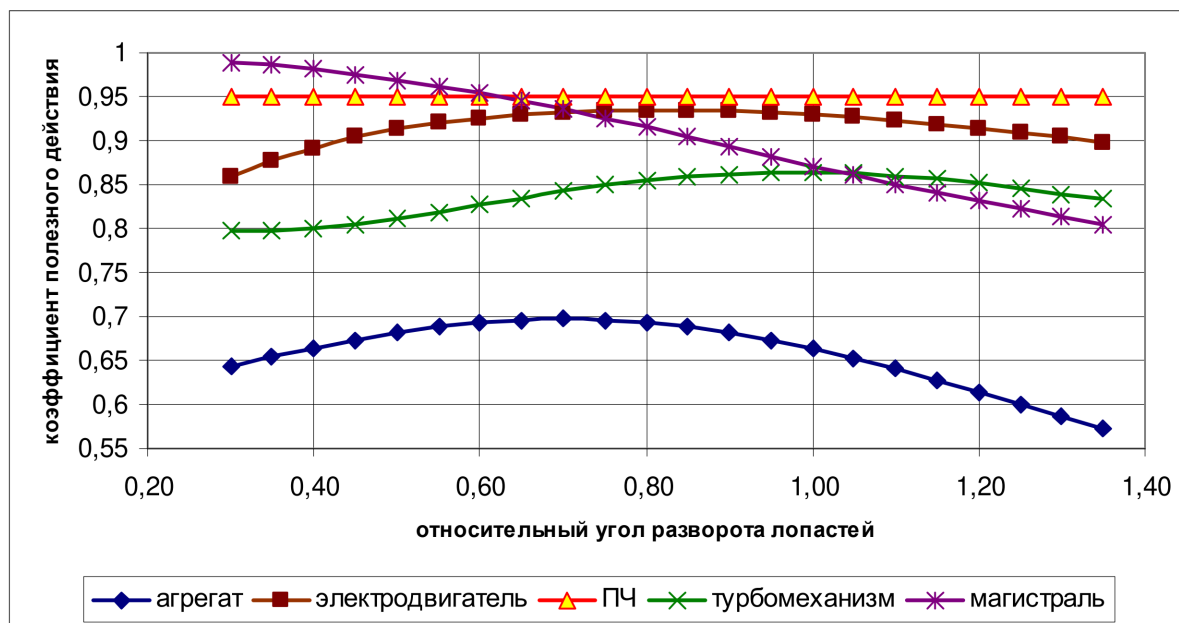


Рисунок 14- Зависимости отдельных КПД агрегата от относительного угла разворота лопастей при относительном статическом напоре равном 0,95

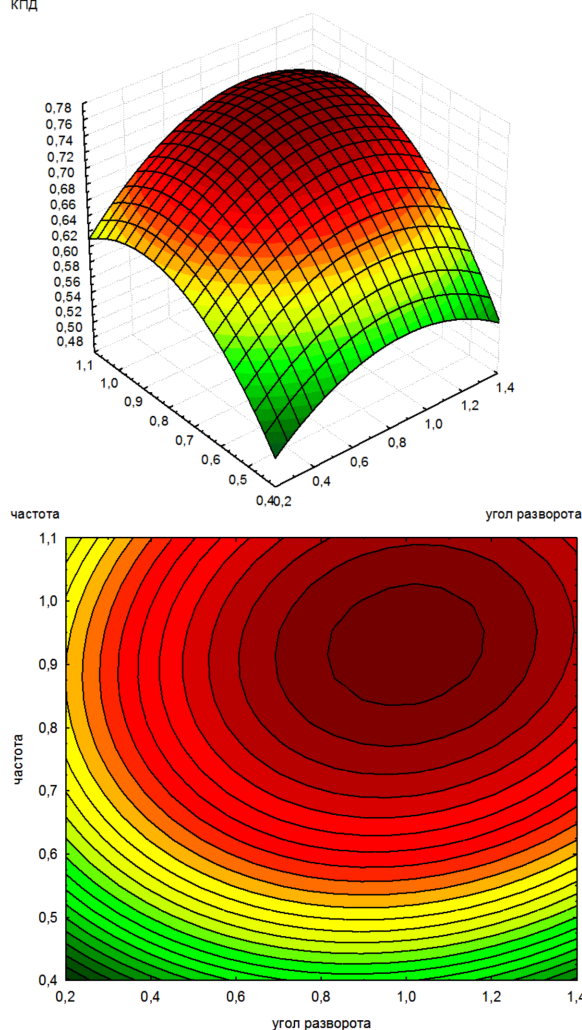


Рисунок 15 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока (скалярное управление) и угла разворота лопастей при $H_{ст}^* = 0,95$

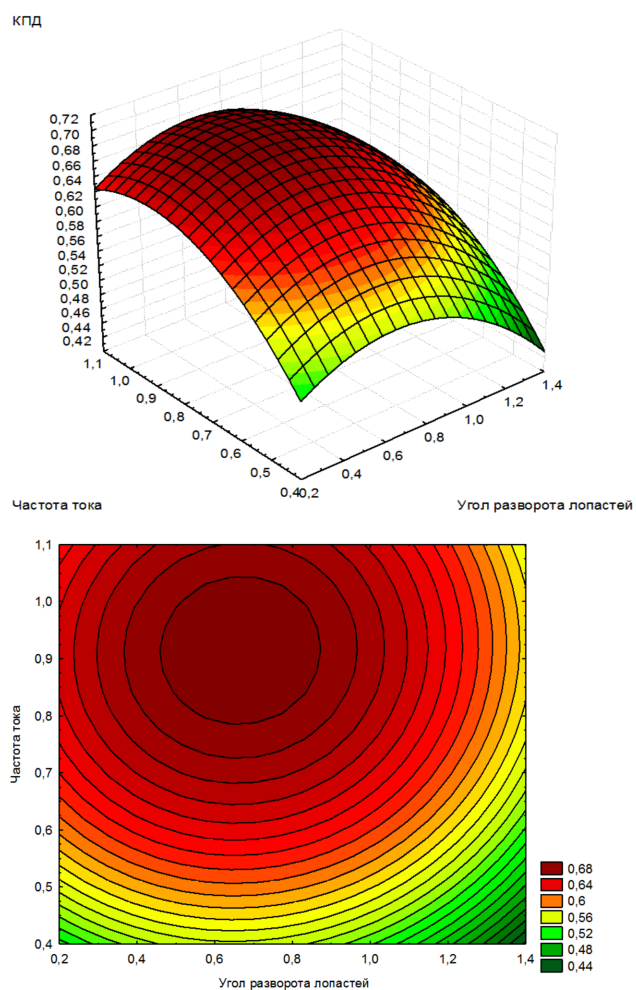


Рисунок 16 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока (скалярное управление) и угла разворота лопастей при $H_{ст}^* = 0,8$

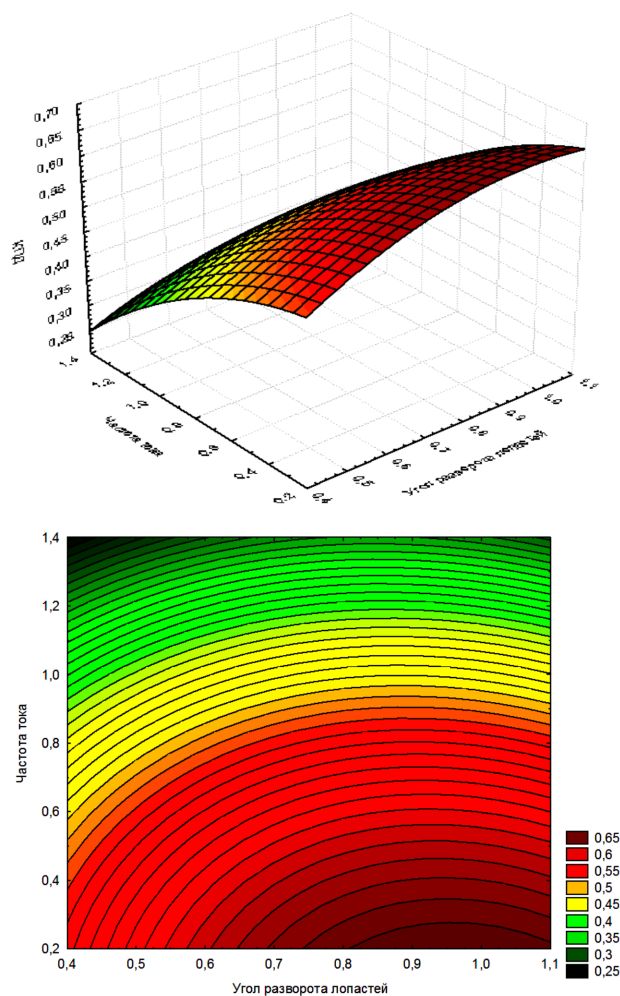


Рисунок 17 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока (скалярное управление) и угла разворота лопастей при $N_{ст}^* = 0,5$

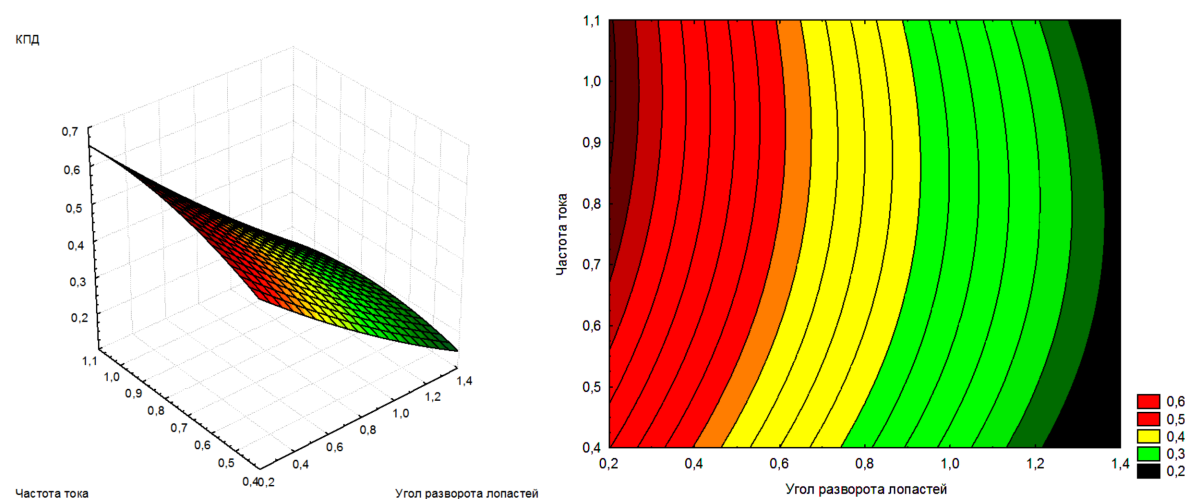


Рисунок 18 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока (скалярное управление) и угла разворота лопастей при $N_{ст}^* = 0,3$

На рисунке 19 приведены характеристики КПД агрегата при изменении частоты тока и величины статического напора. Эти характеристики актуальны в последнее время, так как на станциях стали использовать насосные агрегаты без разворота лопастей. Также эти характеристики нужно использовать и на существующих насосах, где зафиксировано положение лопастей из-за низкой надежности устройства разворота.

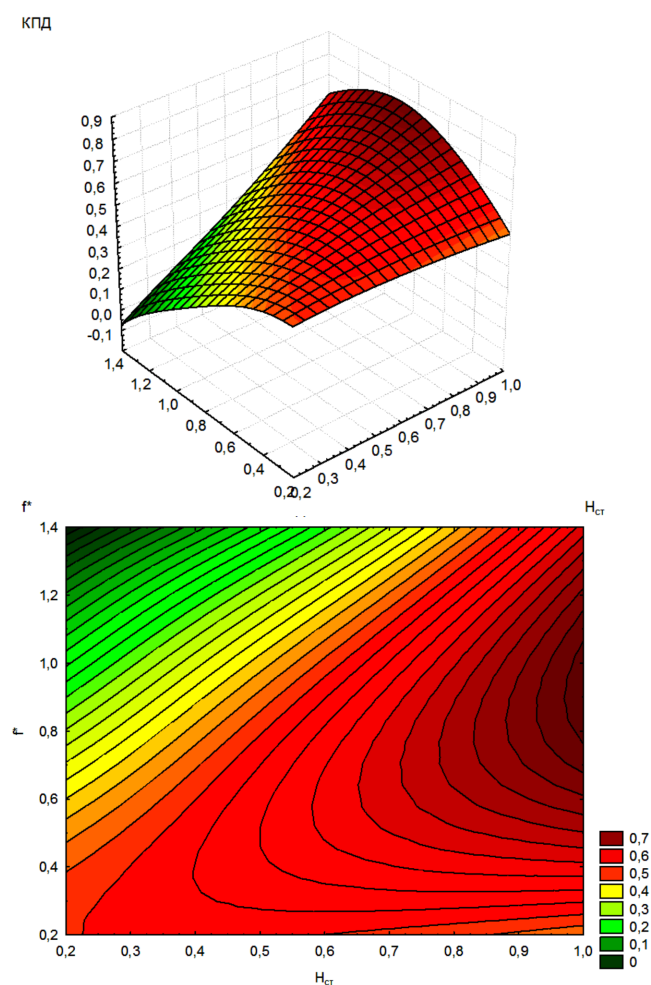


Рисунок 19 – Поверхность и сечение зависимости КПД агрегата от частоты тока (векторное управление) и относительного значения статического напора

Литература

1. Николаев В.Г. Энергосберегающие методы управления режимами работы насосных установок систем водоснабжения и водоотведения: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – Москва, 2010, 48 с.
2. Козлов М., Чистяков А. Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемыми электроприводами// Современные технологии автоматизации. — 2001. — № 1., С76-82.
3. Гоппе Г.Г. Методы и технические средства энерго- и ресурсосберегающего управления турбомеханизмами: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – Иркутск, 2009, 36 с.