



“Fizika-2005”
Beynəlxalq Konfrans
International Conference
Международная Конференция



7 - 9 **İyun** 2005 №154 **səhifə**
June 2005 №154 **page** 595-599
Июнь 2005 №154 **стр.**

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА МИНИМУМ ПОТЕРЬ В СИСТЕМЕ «АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ – РЕДУКТОР – РАБОЧИЙ МЕХАНИЗМ (НАСОС)»

МУСТАФАЕВ Р.И. , ДЖАФАРОВ З.С.

*Азербайджанский научно-исследовательский институт энергетики и энергопроектирования
 Баку, пр. Зардаби, 94
 AZ 1012, тел. 432-80-76, факс 432-80-76*

В статье разработан алгоритм частотного управления на минимум потерь мощности в системе «асинхронный двигатель – редуктор – насос» применительно к электроприводам собственных нужд тепловых электростанций.

В современных условиях наиболее приемлемым вариантом электропривода механизмов собственных нужд ТЭС следует считать систему, состоящую из автономного инвертора напряжения или тока (АИН или АИТ) на IGBT – транзисторах или полностью управляемых тиристорах [1] и трехфазного короткозамкнутого электропривода.

Известно также, что сигналы на включение и управление преобразователем частоты (ПЧ) могут формироваться системой управления либо методом «трансвекторного» управления [2], либо двухконтурной системой управления с жесткой обратной связью по э.д.с. и подчиненным контуром активного тока статора [3].

В общем случае в механизмах собственных нужд ТЭС приводная часть состоит из асинхронного короткозамкнутого двигателя, редуктора и рабочего механизма, большинство из которых представляют собой насосные агрегаты рис.1.

При разработке алгоритма управления на минимум потерь, естественно необходимо учитывать и минимизировать потери электроэнергии во всей системе: в двигателе, редукторе и насосе [4].

Рассмотрим потери в каждом из перечисленных элементов системы в отдельности. При любой нагрузке асинхронного двигателя суммарные потери в нем могут быть представлены в виде [5]:

$$\sum p_{ад} = \Delta p_{ст} + (\Delta p_{M1H} + \Delta p_{добн}) \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 + \Delta p_{M2H} \left(\frac{I_2'}{I_{2H}} \right)^2 + \Delta p_{мех} \quad (1)$$

где $\Delta p_{ст}$ - потери в стали, кВт

Δp_{M1H} - потери в меди статора при номинальном токе статора I_{1H} , кВт

$\Delta p_{добн}$ - добавочные потери при I_{1H} , кВт

Δp_{M2H} - потери в меди статора при номинальном токе ротора I_{2H} , кВт

$\Delta p_{мех}$ - механические потери, кВт

Найдем зависимости каждой из составляющей уравнения (1) от напряжения $k_U = \frac{U_1}{U_H}$; загрузки

$$k_3 = \frac{m}{m_H} \text{ и изменения частоты } k_f = \frac{f}{f_H}$$

На первом этапе определяем зависимость тока статора от токов ротора I_2' тока намагничивания I_o' . Из векторной диаграммы рис.2 из решения косоугольного треугольника токов имеем

$$I_2' = I_2'^2 + I_o'^2 - 2I_2' \cdot I_o' \cdot \cos \phi \quad (2)$$

где угол $\phi_1 = (90 + \phi_2 + \phi_o)$

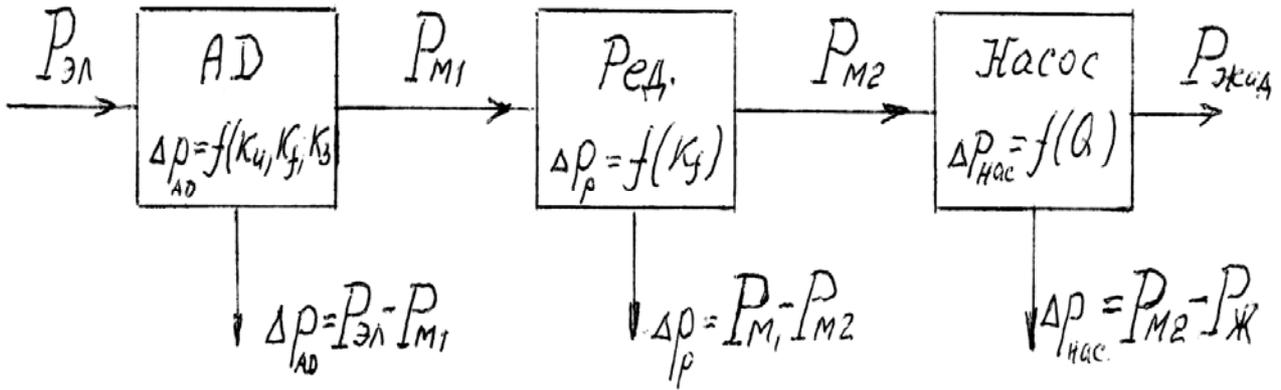


Рис.1. Насосные агрегаты

Уравнение (2) можно также переписать в виде:

$$\left(\frac{I_1}{I_{1H}}\right)^2 = \left(\frac{I_2'}{I_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{I_o}{I_{1H}}\right)^2 + 2 \frac{I_2'}{I_{1H}} \cdot \frac{I_o}{I_{1H}} \sin(\phi_o + \phi_2) \quad (3)$$

В соответствии с [5] углы ϕ_o и ϕ_2 и следовательно и их сумма в зависимости от величины загрузки двигателя, его напряжения и частоты в диапазоне изменения нагрузок от 0,5 до 1 для мощных асинхронных двигателей $\left(\frac{I_{oH}}{I_{1H}}\right) \leq 20\%$ изменяются

в незначительных пределах ($\leq 5-7\%$) поэтому в выражении (3) их можно считать постоянными и равными номинальным значениям.

Тогда уравнение (3) предстанет в виде:

$$\left(\frac{I_1}{I_{1H}}\right)^2 = \left(\frac{I_2'}{I_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{I_o}{I_{1H}}\right)^2 + \kappa_\phi \left(\frac{I_2'}{I_{1H}}\right) \cdot \left(\frac{I_o}{I_{1H}}\right) \quad (4)$$

где $\kappa_\phi = 2 \sin(\phi_{oH} + \phi_{2H})$

Базируясь на аналитических зависимостях приведенных в [5] можно приближенно считать, что ток ротора I_2' , намагничивающий ток I_o зависят от напряжения и частоты в виде следующих соотношений:

$$I_2' \approx I_{2H}' \cdot \kappa_f \frac{\kappa_3}{\kappa_u} \quad (5)$$

и
$$I_o \approx I_{oH} \frac{\kappa_u}{\kappa_f} \quad (6)$$

Потери в стали и механические потери можно определить по следующим соотношениям:

$$\Delta p_{ст} = \Delta p_{стн} (a + b \cdot \kappa_f) \frac{\kappa_u^2}{\kappa_f} \quad (7)$$

$$\Delta p_{мех} \approx \Delta p_{мехн} \kappa_f \quad (8)$$

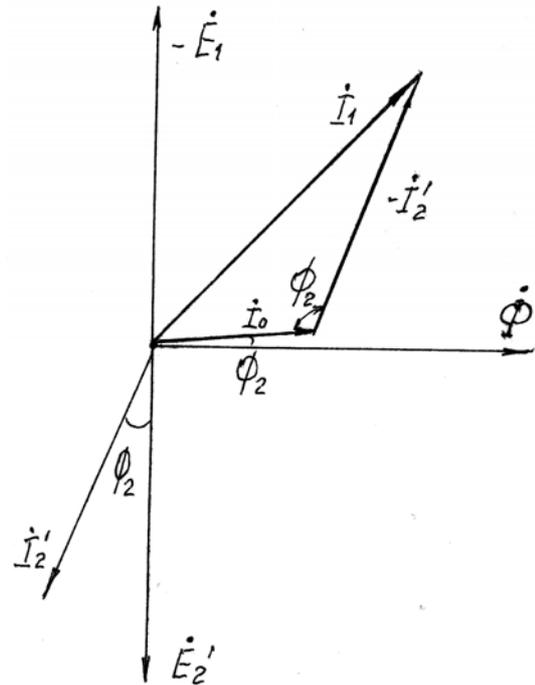


Рис.2. Векторная диаграмма

Здесь коэффициенты a , b учитывают составляющие потерь на чистерезии и вихревые токи соответственно. Например, для слаболегированной стали толщиной 0,5мм и индукции $B=1$ Тл, эти коэффициенты равны $a=0,61$ $b=0,39$. Механические потери прямопропорциональны частоте вращения двигателя ω , а значит и частоте сети κ_f .

Подставляя выражения (4) и (7) и (8) с учетом выражений (5) и (6) в формулу суммарных потерь двигателя (1), получим:

$$\begin{aligned} \Delta p_{AD} = & a \cdot \Delta p_{стн} \frac{\kappa_u^2}{\kappa_f} + b \cdot \Delta p_{стн} \cdot \kappa_u^2 + \\ & + (\Delta p_{м1н} + \Delta p_{добн}) \left[\left(\frac{I_2'}{I_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{I_o}{I_{1H}}\right)^2 + \kappa_\phi \frac{I_2'}{I_{1H}} \cdot \frac{I_o}{I_{1H}} \right] + \\ & + \Delta p_{м2н} \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'}\right)^2 + \Delta p_{мех} \cdot \kappa_f \end{aligned} \quad (9)$$

Окончательно суммарные потери в АД в зависимости от изменения напряжения, частоты и загрузки предстанут в виде:

$$\Delta p_{AD} = a \cdot \Delta p_{стн} \cdot \frac{\kappa_u^2}{\kappa_f} + b \Delta p_{стн} \cdot \kappa_u^2 + \Delta p_{1н} \kappa_f^2 \frac{\kappa_3^2}{\kappa_u^2} + \Delta p_{2н} \frac{\kappa_u^2}{\kappa_f^2} + \Delta p_{3н} \kappa_3 + \Delta p_{M2н} \kappa_f^2 \frac{\kappa_3^2}{\kappa_u^2} + \Delta p_{мехн} \cdot \kappa_f \quad (10)$$

где $\Delta p_{1н} = \Delta p_{M1Дн} \left(\frac{I'_{2н}}{I_{1н}} \right)^2$

$$\Delta p_{3н} = \Delta p_{M1Дн} \cdot \kappa \phi_n \cdot \frac{I'_{2н}}{I_{1н}} \cdot \frac{I_{он}}{I_{1н}}$$

$$\Delta p_{2н} = \Delta p_{M1Дн} \left(\frac{I_{он}}{I_{1н}} \right)^2 \quad \Delta p_{M1Дн} = \Delta p_{M1н} + \Delta p_{добн}$$

При определенном значении частоты и загрузки двигателя на его потери можно влиять только регулированием амплитуды напряжения подводимого к статору АД, т.е. κ_u .

Для определения алгоритма, по которому необходимо регулировать напряжения возьмем производную от выражения (10) и приравняем его нулю

$$\frac{d \sum p_{AD}}{d \kappa_u} = 2a \Delta p_{стн} \frac{\kappa_u}{\kappa_f} + 2b \Delta p_{стн} \cdot \kappa_u - 2 \Delta p_{1н} \frac{\kappa_f^2 \cdot \kappa_3^2}{\kappa_u^3} + 2 \Delta p_{2н} \frac{\kappa_u}{\kappa_f^2} - 2 \Delta p_{M2н} \frac{\kappa_f^2 \cdot \kappa_3^2}{\kappa_u^3} = 0 \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что:

$$\kappa_u = \kappa_f \cdot \sqrt{\kappa_3} \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta p_{1н} + \Delta p_{M2н}}{(a \cdot \kappa_f^2 + b \cdot \kappa_f) \Delta p_{стн} + \Delta p_{2н}}} \quad (12)$$

Выражение (12) показывает, что напряжение необходимо регулировать пропорционально частоте, корню квадратному из загрузки, а также с коррекцией по последнему множителю правой части.

Полученное выражение соответствует закону акад. М.П. Костенко однако в более общей форме

Интересно отметить, что выражение (12) при $\kappa_f=1$ полностью совпадает с выражением (96) [6]

По формуле (12) для двигателя питательного насоса (ПЭН) типа АДД – 5000 с параметрами:

$$\Delta p_{стн}=48 \text{ кВт}; \quad \frac{I_{он}}{I_{1н}}=0,19; \quad \Delta p_{M1Дн}=57 \text{ кВт}; \quad \Delta p_{M2н}=24,4$$

кВт;

$$\Delta p_{добн}=30 \text{ кВт}; \quad \frac{I'_{2н}}{I_{1н}}=0,943; \quad \Delta p_{1н}=50,68 \text{ кВт};$$

$$\Delta p_{M1н}=27 \text{ кВт}; \quad \kappa_3=0,15+0,65 \cdot \kappa_f^2; \quad \Delta p_{2н}=2,057 \text{ кВт};$$

была рассчитана диаграмма изменения напряжения при изменении частоты, при которой достигается минимум потерь в двигателе, которая представлена на рис.3 (кривая1).

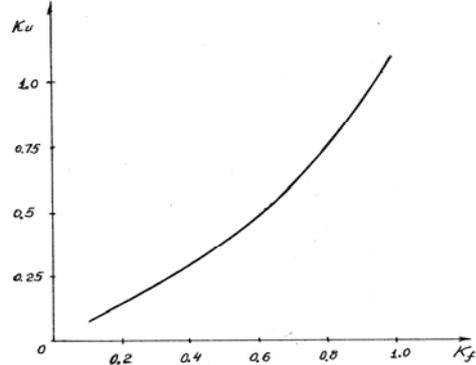


Рис.3. Диаграмма изменения напряжения при изменении частоты, при которой достигается минимум потерь в двигателе.

Очевидно, что регулированием напряжения асинхронного двигателя можно оптимизировать (минимизировать) потери только в самом двигателе, но электропривод включает в себя помимо электродвигателя но и рабочий механизм (питательный насос), а также редуктор. Рассмотрим потери энергии в этих механизмах на конкретных примерах.

На блоках К-300-240 устанавливается пускорезервный питательный насос типа ПЭ-600-300 с номинальной подачей $Q_H=600 \text{ м}^3/\text{ч}$, мощностью $P_{нас}=6300 \text{ кВт}$ номинальная частота вращения $n_n=6300 \text{ об/мин}$. При регулировании производительности насоса путем изменения частоты его вращения изменение к.п.д. представлено на рис.4 (сплошная линия). Там же представлена кривая (пунктирная линия) изменения к.п.д. при регулировании производительности дросселированием. Необходимо отметить, что если бы насос работал на сеть без статического напора, то его η к.п.д. при регулировании производительности изменением частоты вращения оставался бы неизменным. А так как турбомеханизмы применяемые в механизмах собственных нужд ТЭС практически все работают на сеть со статическим напором, то к.п.д. насосов меняется, так как это показано на рис.4

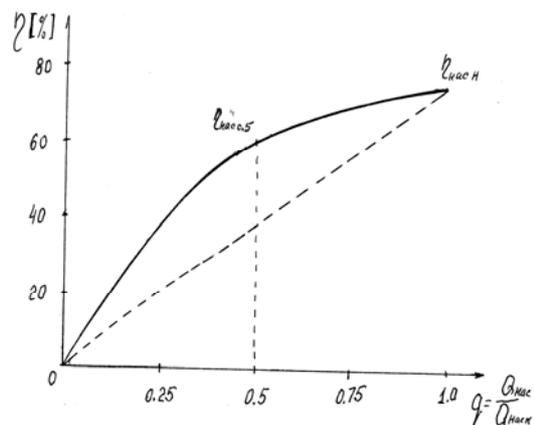


Рис.4.Изменение к.п.д. насосов

Необходимо отметить, что при регулировании производительности дросселированием потока с помощью регулирующей задвижки к.п.д. уменьшается в значительной степени (пунктирная кривая рис.4) (напр. Для насоса ПЭ-600-300 к.п.д. с 75% уменьшается до 37%, т.е. почти в 2 раза при уменьшении подачи с 600 м³/час до 300 м³/ч.). При регулировании подачи при помощи изменения частоты вращения насоса к.п.д. при наличии в сети статического напора будет изменяться в относительно незначительных пределах (сплошная кривая рис.4) (для того же насоса с 75% до ≈ 60%).

В энергетике преобладающее распространение получили лопастные насосы, которые по направлению потока в рабочем колесе подразделяются на центробежные и осевые. Поэтому характеристику изменения к.п.д. этих насосов представленную на рис.4 (сплошная линия) в зависимости от относительной подачи $q = \frac{Q}{Q_n}$, т.е. характеристику к.п.д. в о.е. можно считать универсальной для этих типов насосов [7,8].

Указанная характеристика к.п.д. насоса $\eta_{нас}$ в зоне изменения подачи от 50% до 100% может быть аппроксимирована выражением вида:

$$\eta_{нас} = \sqrt[4]{q} \cdot \eta_{насн} \quad (13)$$

Максимальная ошибка от такой аппроксимации в рабочей зоне работы насоса не превышает ≈3% (для питательных и циркуляционных насосов).

Потери мощности в насосе могут быть рассчитаны по выражению:

$$\Delta P_{нас} = P_{насн} (1 - \eta_{нас}) = P_{насн} (1 - \sqrt[4]{q} \cdot \eta_{насн}) \quad (14)$$

где $P_{насн}$ – номинальная мощность насоса

$$q = \frac{Q}{Q_n} - \text{относительная подача насоса}$$

$\eta_{насн}$ – номинальный к.п.д. насоса

Если взять в качестве примера питательный насос блока К-300-240 с номинальной подачей $Q_n=600$ м³/ч и номинальной мощностью $P_{насн}=6300$ кВт потери в насосе при номинальном режиме составляют $\Delta P_{насн}=1575$ кВт, а при снижении производительности до 50% эти потери возрастают до 2331 кВт, т.е. увеличиваются почти на 40%.

Для передачи крутящего момента от электродвигателя к насосу применяется редуктор. Например, для питательного насоса применяется зубчатый редуктор с повышением частоты с 48 об/сек до 125 об/сек [9]. Редуктор выполнен одноступенчатым с двумя цельнокованными шестернями, шевронные зубцы которых обеспечивают плавное зацепление и уравнивание осевого давления.

Зависимость к.п.д. от загрузки от 50 до 100% с погрешностью менее 5% эти кривые можно заменить прямыми.(рис.5)

Следовательно, для редукторов на основании [9] можно записать

$$\Delta p_{pe} = \kappa_f^{1,8} \{1 - [(2\eta_{po.5} - \eta_{pном}) + 2(\eta_{pном} - \eta_{po.5}) \cdot \kappa_3]\} P_{АДн} \dots \quad (15)$$

где $P_{АДн}$ – номинальная мощность приводного двигателя

$$\kappa_3 = \frac{M_{ред0}}{M_{редн}} - \text{коэффициент загрузки редуктора}$$

$\eta_{ред0,5}$ – к.п.д. редуктора при 50 % загрузке

$\eta_{редн}$ – номинальный к.п.д. редуктора

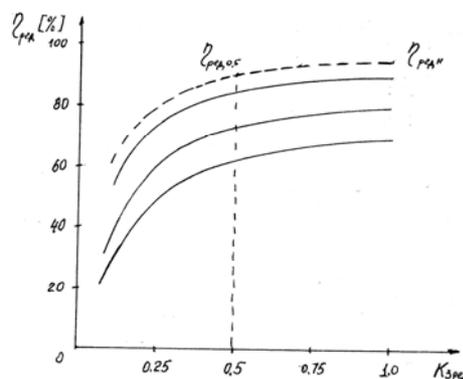


Рис.5. Зависимость к.п.д. от загрузки от 50 до 100% с погрешностью менее 5%

Таким образом, суммарные потери мощности в системе «асинхронный двигатель – редуктор – центробежный насос» определяются выражениями (9) (14) и (15).

Здесь необходимо отметить одно обстоятельство. На общие потери мощности в АД можно воздействовать только путем регулирования амплитуды подводимого к двигателю напряжения. Изменение частоты практически определяется только технологическим процессом, т.е. режимом работы насоса, т.е. частота регулируется строго по технологии. Поэтому на величину потерь мощности в редукторе и в насосе возможно воздействовать путем изменения загрузки и частоты вращения. Считая, что потери мощности в АД несравненно меньше, чем потери в насосе и редукторе, для начального правильного подбора оборудования определим оптимальную частоту вращения при определенной загрузке механизмов.

Для этого сначала в формуле (14) заменим производительность насоса на коэффициент загрузки установив при этом между ними соответствующую аналитическую связь. В соответствие с [8] зависимость мощности на валу от расхода можно аппроксимировать прямой линией:

$$P_{нас} = P_o \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^3 + A_u \cdot Q \left(\frac{n}{n_{ном}} \right)^2 \quad (16)$$

здесь P_o – мощность на валу турбомеханизма соответствующая закрытой задвижке $Q=0$ (т.е. при расходе равном нулю)

$$A_u = \frac{P_{насн} - P_o}{Q_n}$$

Записав уравнение (16) в относительных единицах и разрешив его относительно $q = \frac{Q}{Q_n}$, и

учитывая что $\kappa_3 = \frac{M_{нас}}{M_{наси}}$ получим:

$$q = \frac{\kappa_3}{\kappa_f \cdot A} - \frac{(1-A) \cdot \kappa_f}{A} \quad (17)$$

где $\kappa_3 = \frac{M_{нас}}{M_{наси}}$; $\kappa_f = \frac{f}{f_{ном}} = \frac{n}{n_{ном}}$;

$$A = 1 - \frac{P_o}{P_{наси}}$$

Окончательно подставив выражение (17) в формулу (14) получим выражение для потерь мощности в насосе в виде:

$$\Delta p_{нас} = \left(1 - \eta_{наси} \sqrt[4]{\frac{\kappa_3 - \kappa_f^2(1-A)}{A \cdot \kappa_f}} \right) P_{наси} \quad (18)$$

Теперь в общем случае потери в системе минимизируются если суммарные потери в системе:

$$\sum \Delta p_{сис} = \Delta p_{АД}(\kappa_u; \kappa_f, \kappa_3) + \Delta p_{рез}(\kappa_f; \kappa_3) + \Delta p_{нас}(\kappa_f; \kappa_3) \rightarrow \min \quad (19)$$

Проанализируем выражение (18), чтобы к.п.д. оставался максимальным (номинальным) необходимо определить связь между κ_3 и κ_f ; этому условию удовлетворяет равенство:

$$\kappa_3 = (1-A)\kappa_f^2 + A \cdot q \cdot \kappa_f \quad (20)$$

Решая это квадратное уравнение можно получить условие, при котором существующей нагрузке насоса будет соответствовать оптимальная частота вращения:

$$\kappa_{f_{опт}} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4(1-A)\kappa_3}}{2(1-A)}$$

Например, при коэффициенте загрузки насоса равным $\kappa_3 = 0,9$, а эта величина соответствует номинальной нагрузке блока соответствующая оптимальная частота вращения равна $\kappa_{f_{опт}} = 0,937$, при этом потери мощности составят как и в номинальном режиме $\Delta p_{наси} = 1575$ квт. В редукторе при той же частоте потери составят (при $\eta_{редн} = 0,95$ $\eta_{ред0,5} = 0,9$):

$$\Delta p_{рез} = 0,937^{1,8} \{ [1 - (2 \cdot 0,9) + 2(0,95 - 0,9)0,7] \} \cdot 8000 = 569,2 \text{ квт}$$

Необходимо отметить, что при полной нагрузке насоса и номинальной скорости вращения потери в редукторе составляют $\Delta p_{рез} = 576$ квт.

С методической точки зрения было бы более правильно взять произвольную выражения (19) по относительной частоте $\frac{\sum \Delta p_{сис}}{d\kappa_f}$ и приравняв это

выражение нулю, получить зависимость $\kappa_f = f(\kappa_3)$ для системы, однако получить в явном виде аналитическую зависимость невозможно поэтому, проще подсчитать на ПК эту зависимость для конкретных параметров элементов системы.

В общем, неявном виде эта зависимость представляется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\sum \Delta p_{сис}}{d\kappa_f} = & -a \cdot \Delta p_{стн} \cdot \kappa_u^2 \cdot \kappa_f^2 + 2\kappa_f^5 \Delta p_{1н} \frac{\kappa_3^2}{\kappa_u^2} - \\ & - 2\kappa_f \Delta p_{2н} \kappa_u^2 + 2\kappa_f^5 \Delta p_{м2н} \frac{\kappa_3^2}{\kappa_u^2} + \kappa_f^4 \Delta p_{мех} + \\ & + 1,8\kappa_f^{4,8} \{ 1 - [D + B \cdot \kappa_3] \} P_{АДН} - \\ & - \frac{1}{4} \kappa_f^3 \frac{\kappa_3 + \kappa_f^2(1-A)}{\sqrt[4]{A\kappa_f [\kappa_3 - \kappa_f^2(1-A)]^3}} \eta_{наси} \cdot P_{наси} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

где $D = 2 \cdot \eta_{р0,5} - \eta_{рн}$; $B = 2(\eta_{рн} - \eta_{р0,5})$

- [1]. Омаров Б.И., Башкиров В.И. Новое поколение IGBT-транзисторов для электропривода. Электротехника №12, 2002г.
- [2]. Blaschke F. The Principle of Feld Orientation as Applied to the New Transvertor Closed Loop Control System for Rotating Machines – Siemens Rev.,vol 34, 1972
- [3]. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями М., Энергия, 1974г.
- [4]. Попович Н.Г., Печеник Н.В., Ковальчук А.В., Киселечник О.И. Особенности экстремальных электромеханических систем автоматического управления и задача энергосбережения. Электротехника № 3, 2003 г.
- [5]. Сырометников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М., Энергоатомиздат 1984г.
- [6]. Проданов Л.В. Определение упрощенного критерия минимальных потерь при регулировании напряжения для заданной группы электродвигателей. Изв. Вузов Энергетика №3, 1974г.
- [7]. Рихтер Л.А., Елизаров Д.П., Лавыгин В.М. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций. М., Энергоатомиздат, 1987 г.
- [8]. Справочник по автоматизированному электроприводу. Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского М., Энергоатомиздат., 1983 г.
- [9]. Редукторы энергетических машин. Справочник. Под общей редакцией проф. Ю.А. Державца. Ленинград, «Машиностроение», 1985 г.