

ГЛАВА 1.

СТРУКТУРА И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1.1. Основные принципы построения систем частотно-регулируемого электропривода

Для управления асинхронного двигателя (АД) принципиально можно воздействовать на величину, частоту и фазу напряжения статора. Частота напряжения определяет скорость вращения АД. Отношение напряжения к частоте задает магнитный поток двигателя. Требования к величине магнитного потока в статическом режиме определяются характером нагрузки и требованиями предъявляемыми к электроприводу (точность поддержания скорости, перегрузочная способность, экономичность и т.д.). При жестких требованиях к динамике электропривода необходимо поддерживать постоянство потока во время переходного процесса. В любом случае магнитный поток не должен превышать номинальный поток во избежание насыщения магнитного потока от нагрузки на валу. Зависимости напряжения от частоты, обеспечивающие соответствие потока двигателя характеру статической нагрузки называют законами частотного управления[7].

На выходе двигатель характеризуется двумя механическими величинами: момент и угловой частотой вращения, которые связаны уравнением движения:

$$M - M_n = M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1)$$

где M_n - нагрузочный момент;

$M_{дин}$ - динамический момент;

J - момент инерции, приведенный к валу двигателя.

Как правило, целью управления является угловая частота вращения или момент двигателя.

Таким образом, задачей частотно-регулируемого асинхронного электропривода является обеспечение заданной скорости (момента) двигателя при поддержании требуемого значения магнитного потока. В зависимости от области применения и дополнительных требований к электроприводу (например, экономичности) эта задача может быть решена в разомкнутой системе, в замкнутой системе по скорости, в замкнутой системе по магнитному потоку, в системе замкнутой как по скорости, так и по магнитному потоку[7].

При заданной нагрузке режим работы АД (скорость, момент, ток, энергетические характеристики) однозначно определяется частотой и магнитным потоком (т.е. отношением напряжения к частоте) или частотой и током статора. Соответственно различают системы электропривода, формирующие сигналы задания частоты и напряжения или частоты и тока статора. В первом случае ПЧ работает источника напряжения, во втором-режиме источника тока (частотно-токовое управление, ЧТУ).

Схема замещения АД при переменной частоте - Регулирование частоты вращения позволяет плавно и в широком диапазоне изменять скорость вращения АД, сохраняя примерно постоянными потерями в машине на любой искусственной механической характеристике. Для анализа установившихся процессов в АД при переменной частоте используют систему замещения, приведенную на рис.(1.1).

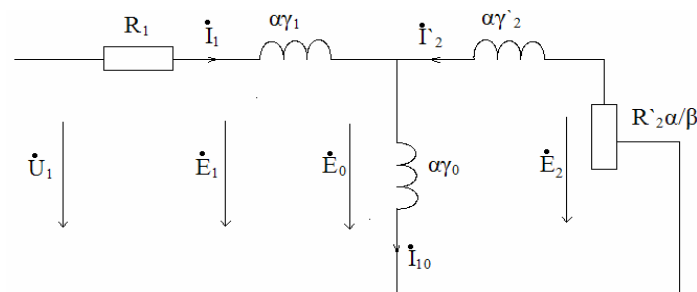


Рис 1.1. Схема замещения АД при переменной частоте

В соответствии с Г-образной схемой замещения уравнение механической характеристики принимает вид

$$M = \frac{1.5 \cdot u^2 \cdot R_2 \cdot p}{s \cdot f_1 \cdot \pi \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]} \quad (1.2)$$

В этой схеме индуктивные сопротивления являются функцией относительной частоты

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1ном}} \quad (1.3)$$

Степень нагрузки АД характеризуется абсолютным скольжением

$$\beta = \frac{f_2}{f_{1ном}} \quad (1.4)$$

Введение этой величины связано с тем, что при переменной частоте скольжение s уже не определяет однозначно нагрузку АД, являясь еще и функцией частоты f_1 .

Учитывая, что $f_2 = s f_1$, получаем связь между β и s :

$$\beta = s \alpha = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_{1ном}} \quad (1.5)$$

Абсолютное скольжение β в теории АД при переменной частоте играет ту же роль, что и относительное скольжение s при постоянной частоте, т.е. характеризует момент двигателя. Если пренебречь сопротивлением обмотки статора r_1 , то β однозначно определяет момент АД при любой частоте.

Относительная угловая частота вращения АД $\omega' = \frac{\omega}{\omega_{1ном}}$ связана с α и β отношением

$$\alpha = \beta + \omega \quad (1.6)$$

1.2. Основные способы частотного управления АД

Закон частотного управления $\frac{U}{f} = \text{const}$ - Простейший

способ частотного управления заключается в изменении величины напряжения, подводимого к АД, пропорционально частоте:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1ном}}{f_{1ном}} = \text{const} \quad (1.7)$$

Данный закон не учитывает изменения нагрузки АД и, следовательно, может быть реализован в разомкнутой системе электропривода.

Уравнения, описывающие процессы в АД при $\frac{U}{f} = \text{const}$, имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 - \dot{I}_{10} &= 0 \\ \dot{I}_1(r_1 + j\alpha x_1) + \dot{I}_{10}j\alpha x_0 &= \dot{U}_{1ном}\alpha \\ \dot{I}_2\left(r'_2 \frac{\alpha}{\beta} + j\alpha x'_2\right) + \dot{I}_{10}j\alpha x_0 &= 0 \end{aligned} \quad (1.8)$$

По полученным в результате решения уравнений (1.8) значениям токов $\dot{I}_1, \dot{I}_{10}, \dot{I}_2$ могут быть определены момент, угловая частота вращения, поток и другие величины, характеризующие работу двигателя[17].

Механические характеристики АД для режима частотного управления $\frac{U}{f} = \text{const}$ приведены на рис.(1.2,а,б). Отсюда видно, что уменьшение частоты приводит к уменьшению максимального момента АД. Это объясняется возрастающим влиянием падения напряжения на активном сопротивлении статора, что приводит к уменьшению э.д.с. E_1 и E_0 , а значит- к уменьшению магнитного потока двигателя. Падение магнитного потока при данной частоте тем больше, чем больше абсолютное скольжение т.е. нагрузка АД (рис.1.3).

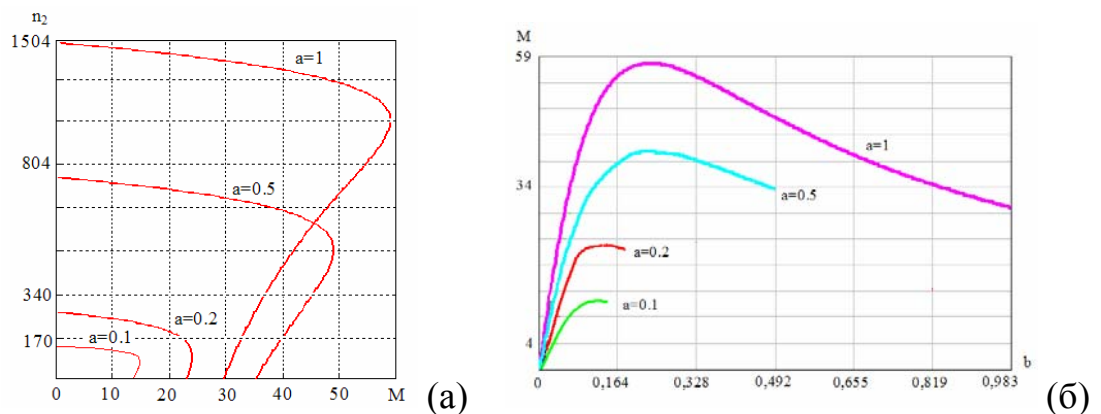


Рис 1.2. Механические характеристики АД при управлении по закону

$$\frac{U}{f} = \text{const}$$

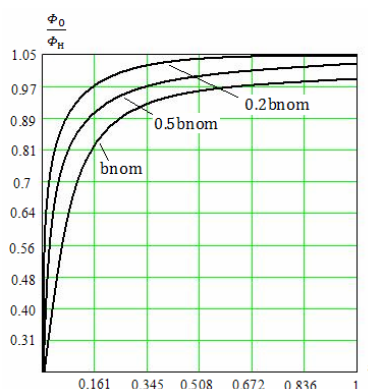


Рис 1.3. Зависимость потока от частоты при $\frac{U}{f} = \text{const}$

Кроме того, с уменьшением частоты снижается жесткость механических характеристик, что, в конечном итоге, приводит к уменьшению активной составляющей тока ротора[12].

Значительное снижение перегрузочной способности АД не позволяет использовать закон $\frac{U}{f} = \text{const}$ при частотах менее 25-30 Гц в электроприводах с постоянным моментом нагрузки. Для расширения диапазона регулирования необходимо при уменьшении частоты увеличивать отношение $\frac{U_1}{f_1}$, чтобы поддерживать постоянным поток. На рис.(1.4,а) приведена вольтчастотная характеристика, рассчитанная таким образом, чтобы максимальный момент АД при уменьшении частоты оставался равным номинальному максимальному моменту (рис.1.4,б).

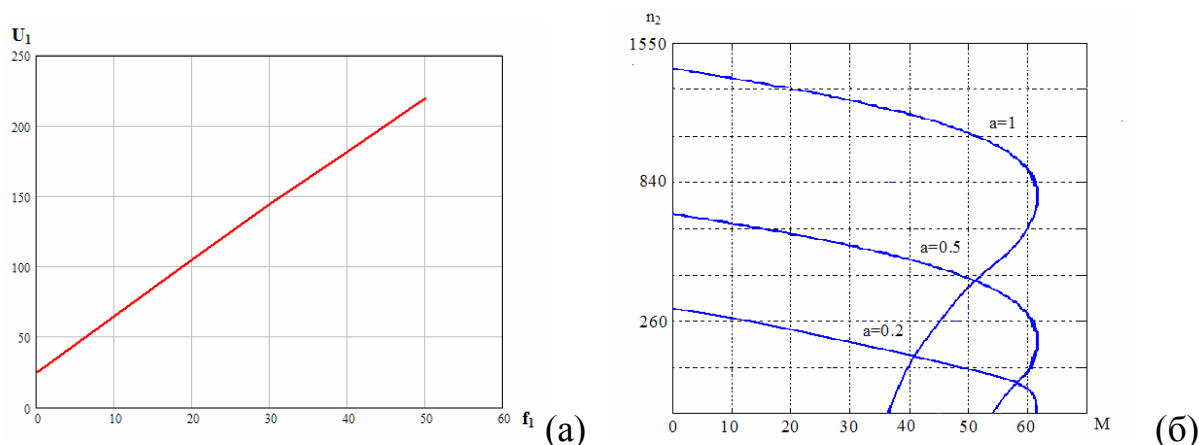


Рис 1.4. Вольтчастотная характеристика с повышенным отношением $\frac{U_1}{f_1}$ (а) и соответствующие ей механические характеристики АД (б)

Применение ВЧХ с повышенным значением $\frac{U_1}{f_1}$ позволяет значительно расширить диапазон регулирования за счет увеличения максимального момента АД на низких частотах. Недостатком данного способ является возрастание магнитного потока на низких частотах при малых нагрузках (рис.1.5,а). В режиме близком к холостому ходу ток двигателя соизмерим с номинальным током (рис.1.5,б), при этом магнитопровод АД оказывается сильно насыщенным, соответственно возрастают потери[22].

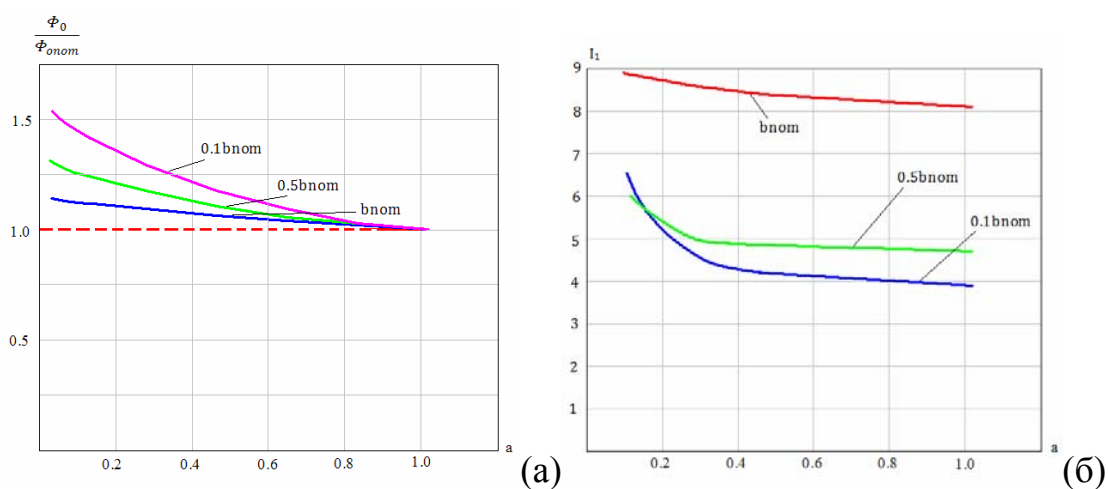


Рис 1.5. Зависимость потока (а) и тока двигателя (б) от частоты при использовании, ВЧХ с повышенным значением $\frac{U_1}{f_1}$

Тем не менее, такой поход широко используется на практике. Если заранее известен характер нагрузки, можно подобрать такую ВЧХ, которая обеспечит не только устойчивую, но и экономичную работу двигателя.

Законы частотного управления с постоянством магнитного потока. Для стабилизации полного потока статора при изменении нагрузки напряжение U_1 необходимо регулировать так, чтобы скомпенсировать влияние на величину э.д.с. E_1 падения напряжения на активном сопротивлении статора. В замкнутой системе электропривода, построенной на таком принципе компенсации, выполняется условие

$$\psi_1 = C_\psi \frac{E_1}{f_1} = const \quad (1.9)$$

Уравнения, описывающие процессы в АД при $\psi_1 = const$, имеют вид

$$\begin{aligned}
 i_1 + i_2 - i_{10} &= 0, \\
 \dot{U}_1 - i_1 r_1 &= E_{1ном} \alpha, \\
 i_1 j \alpha x_1 + i_{10} j \alpha x_0 &= E_{1ном} \alpha, \\
 i_2' \left(r_2' \frac{\alpha}{\beta} + j \alpha x_2' \right) + i_{10} j \alpha x_0 &= 0,
 \end{aligned} \quad (1.10)$$

Характеристики АД, построенные по результатам решения уравнений (1.6) приведены на рис. (1.6 - 1.8).

Вольтчастотные характеристики (рис.1.6) представляют собой семейство прямых, каждая из которых соответствует заданному скольжению. Область двигательного режима находится справа от линии $\alpha = \beta$. Компенсация падения напряжения $i_1 r_1$ достигается за счет повышения напряжения с возрастанием нагрузки [22]. Поэтому в верхнем диапазоне частот при больших нагрузках строгое выполнение закона $\psi_1 = const$ в системе ПЧАД, оказывается невозможным (напомним, что максимальное значение фазного напряжения ПЧ со звеном постоянного тока $U_1 = 0.45 U_d$.

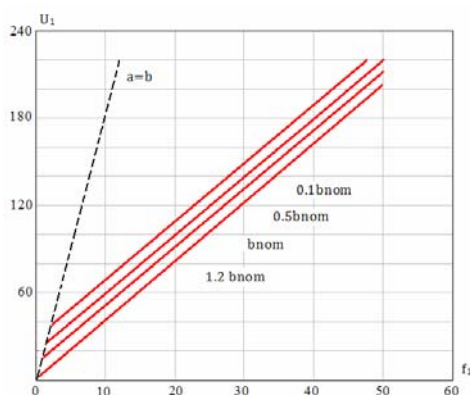


Рис 1.6. Вольтчастотные характеристики для закона частотного управления

$$\psi_1 = const$$

Благодаря постоянству потока максимальный момент АД не зависит от частоты (рис.1.7,а), а момент двигателя однозначно определяется абсолютным скольжением при любой частоте (рис.1.7,б), т.е. механические характеристики при всех частотах обладают одинаковой жесткостью.

Важной особенностью, характеризующей работу АД в рассматриваемом режиме, является постоянство тока статора во всем диапазоне регулирования частоты при фиксированной нагрузке (рис.1.8,а). Соответственно, имеет место однозначная связь между током статора и абсолютным скольжением во всем диапазоне частот (рис.1.8,б).

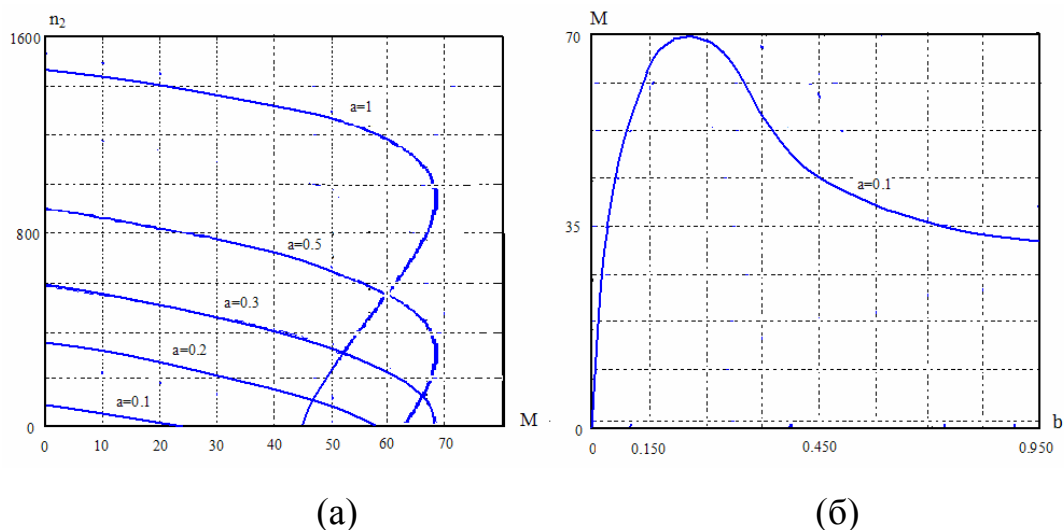


Рис 1.7. Механические характеристики АД при $\psi_1 = const$

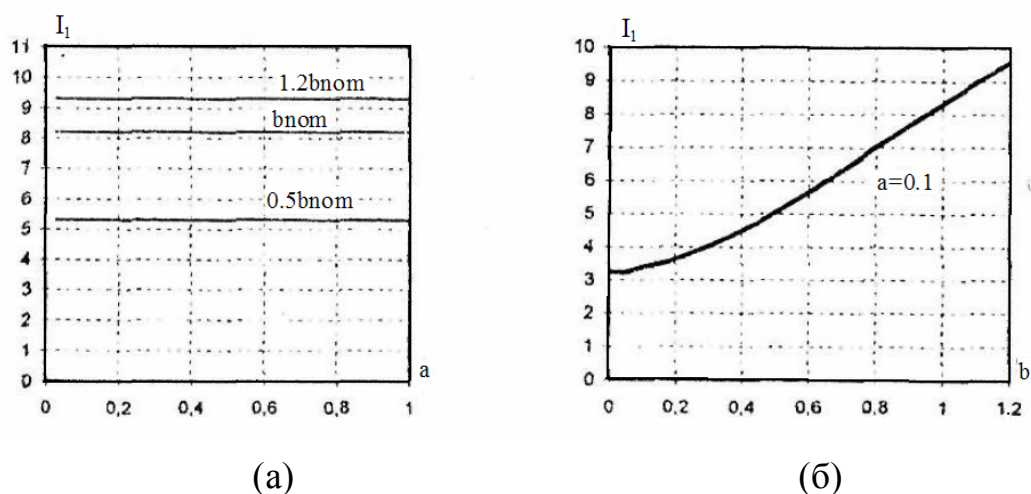


Рис 1.8. Электромеханические характеристики АД при $\psi_1 = const$

Применение закона $\psi_1 = const$ обеспечивает постоянство максимального момента АД при изменении частоты, однако при увеличении нагрузки основной поток уменьшается так же, как и при номинальной частоте. Для поддержания $\psi_1 = const$ необходимо в замкнутой системе компенсировать падение напряжений на элементах r_1 и αx_1 схемы замещения АД при частотном управлении[23].

Уравнения, описывающие процессы в АД при $\psi_1 = \text{const}$, имеют вид

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 &= -j \frac{E_{0\text{ном}}}{x_0}, \\ i_1(r_1 + j\alpha x_1) - \dot{U}_1 &= -\dot{E}_{0\text{ном}}\alpha, \\ i_2\left(r'_2 \frac{\alpha}{\beta} + j\alpha x'_2\right) &= -\dot{E}_{0\text{ном}}\alpha, \end{aligned} \quad (1.11)$$

Характеристики АД для рассматриваемого режима качественно повторяют характеристики, полученные ранее для режима $\psi_1 = \text{const}$. Для компенсации падения напряжения на сопротивлении αx_1 необходимо дополнительно повышать напряжение U_1 . Поэтому диапазон частот и нагрузок, при которых выполняется закон $\psi_0 = \text{const}$. Характер изменения этого диапазона показан на рис.(1.9). Сплошными линиями выделены те фрагменты характеристик $U_1(\alpha, \beta)$, для которых данный закон реализуем.

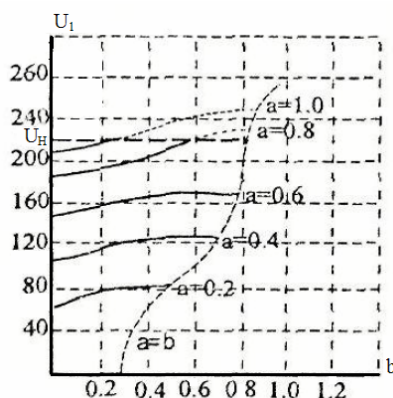


Рис 1.9. Зависимость $U_1(\alpha, \beta)$ при $\psi_0 = \text{const}$

Жесткость механических характеристик (рис.1.10) и максимальный момент АД значительно возрастают. Для рассматриваемого в качестве примера двигателя 4A100L4У3 максимальный момент увеличивается в 1,2 раза по сравнению с режим $\psi_0 = \text{const}$ и в 1,8 раза по сравнению с номинальным режимом. Благодаря этим достоинствам закон $\psi_0 = \text{const}$ обеспечивает не только оптимальное использование магнитопровода машины, но и высокую статическую и динамическую точность[28].

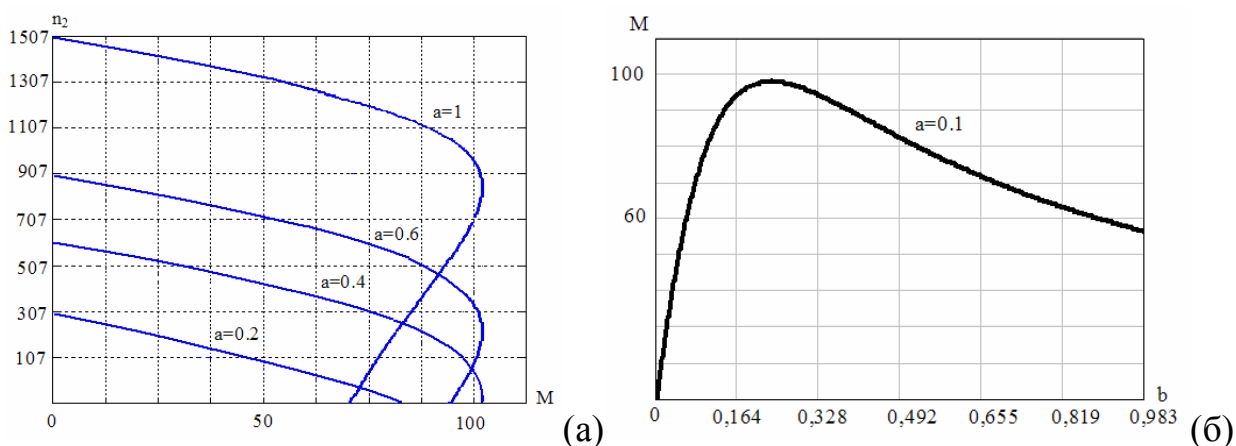


Рис 1.10. Механические характеристики АД при $\psi_0 = const$

Электрохимические характеристики, связывающие ток статора, абсолютное скольжение и поток (рис.1.11) могут быть использованы при построения замкнутых систем частотного управления. Например, система регулирования, в которой поддерживаются постоянными абсолютное скольжение и основной поток, обеспечивает постоянство тока статора и момента АД во всем диапазоне регулирования. Если соответствующим образом регулировать поток и ток статора, то обеспечивается стабилизация абсолютного скольжения. Наконец, требуемый поток может быть получен при воздействии на ток статора и абсолютное скольжение[28].

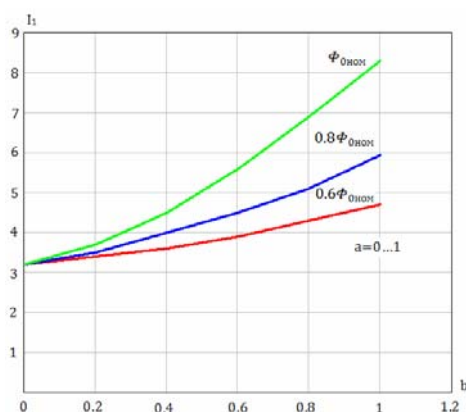


Рис 1.11. Электрохимические характеристики АД при $\psi_0 = const$

Если путем регулирования напряжения U_1 компенсировать падения напряжений на элементах r_1, ax_2 и ax'_2 по условию $E_2/f_1 = const$, то получим режим частотного управления с постоянством полного потокосцепления ротора $\psi_2 = const$. В этом случае механические

характеристики АД аналогичны характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и момент двигателя не имеет максимума. На рисунке (1.17) для сравнения приведены механические характеристики АД для всех рассмотренных выше режимов частотного управления с постоянством магнитного потока.

Системы частотного управления с регулируемым напряжением - Изменение частоты f_1 требует соответствующего изменения напряжения на статорных обмотках U_1 . Возможны три метода регулирования напряжения:

- а. Регулирование напряжения двигателя на стороне постоянного тока (регулирование U_n).
- б. Регулирование напряжения двигателя на стороне переменного тока (после инвертора).
- в. Регулирование напряжения внутри инвертора.

1.3. Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

Различают два типа преобразователей частоты: преобразователи с непосредственной связью сети и нагрузки и преобразователи со звеном постоянного тока.

Преобразователи с непосредственной связью (НПЧ) строят на основе реверсивных управляемых выпрямителей. Силовая часть трехфазно-трехфазного НПЧ показана на рис. (1.24,а). Каждая фаза АД связана с сетью через два встречно включенных выпрямителя, каждый из которых управляется в течение полупериода выходного напряжения НПЧ. В результате на выходе НПЧ формируется кривая выходного напряжения (рис.1.24,б), состоящая из фрагментов сетевых напряжений[50].

Форма и величина выходного напряжения НПЧ регулируются изменением угла управления α , отсчитываемого от моментов естественной коммутации тиристоров.

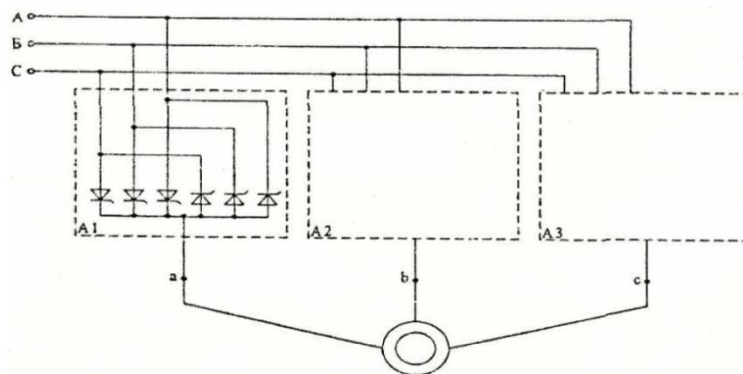
Можно отметить следующие особенности НПЧ:

- однократное преобразование энергии, поступающей от сети;
- возможность свободного обмена энергией между сетью и двигателем;
- большая установленная мощность силовых элементов;
- верхняя граница диапазона регулирования частоты составляет примерно 40% от частоты сети.

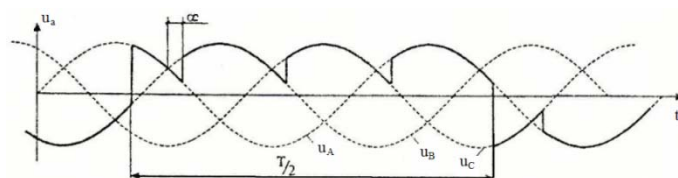
В силу этих особенностей НПЧ находят основное применение в тихоходном электроприводе большой мощности (приводы прокатных станов, шаровых мельниц и т.д.).

В ПЧ со звеном постоянного тока осуществляется двукратное преобразование энергии: сначала сетевое напряжение преобразуется в постоянное, а затем постоянное напряжение посредством инвертора преобразуется в переменное напряжение (ток). В зависимости от типа инвертора различают ПЧ на основе автономного инвертора тока (АИТ) и ПЧ на основе автономного инвертора напряжения (АИН)[56].

До появления нового поколения силовых транзисторов широко применялись ПЧ на основе тиристорных АИТ с узлами принудительной конденсаторной коммутации. Основным недостатком таких АИТ является чувствительность к изменению нагрузки. Инвертор тока не может работать на холостом ходу и не допускает резких изменений тока нагрузки. Кроме того, выходной ток АИТ имеет прямоугольно-ступенчатую форму, что ограничивает нижний предел регулирования частоты[56].



(a)



(б)

Рис 1.12. Схема (а) и временные диаграммы (б) выходного напряжения НПЧ

Схема силовой части ПЧ на основе АИН приведена на рис.(1.13). Звено постоянного тока содержит выпрямитель В и емкостной фильтр С (в преобразователях средней и большой мощности используется LC фильтр). В качестве силовых элементов используются IGBT - транзисторы VT1-VT6. Обратные диоды VD1-VD6 предназначены для замыкания реактивного тока нагрузки. Если управление транзисторами в каждой стойке АИН (VT1, VT2 и т.д.) осуществляется в противофазе, то, благодаря двухсторонней проводимости плеч инвертора (VT1, VD1 и т.д.), форма выходного напряжения не зависит от параметров нагрузки. Таким образом, АИН обладает свойствами источника напряжения [15]. На рис.1.14 представлена структурная модель ПЧ-АД в среде MatLab Simulink.

“Система ПЧ-АД”

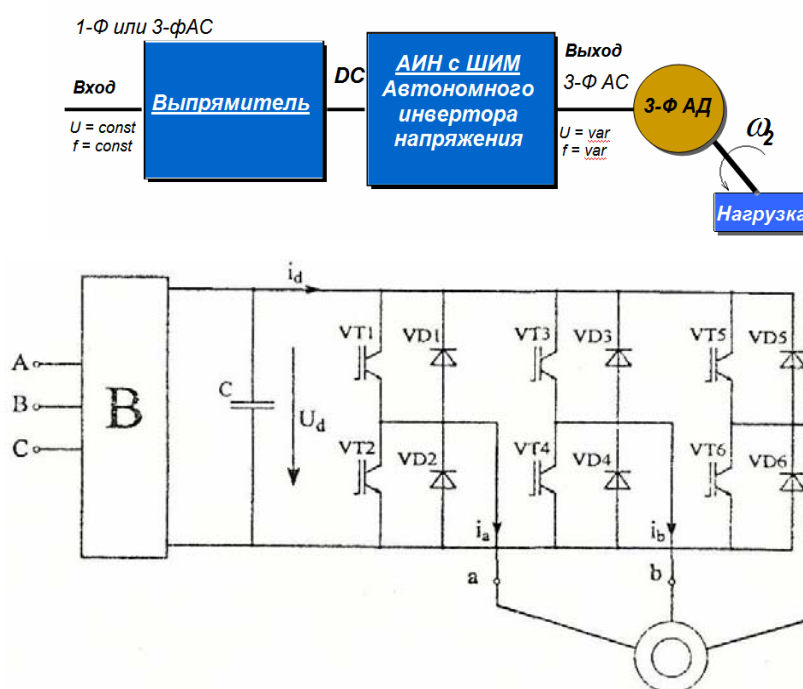


Рис.1.13. Преобразователь частоты на основе АИН

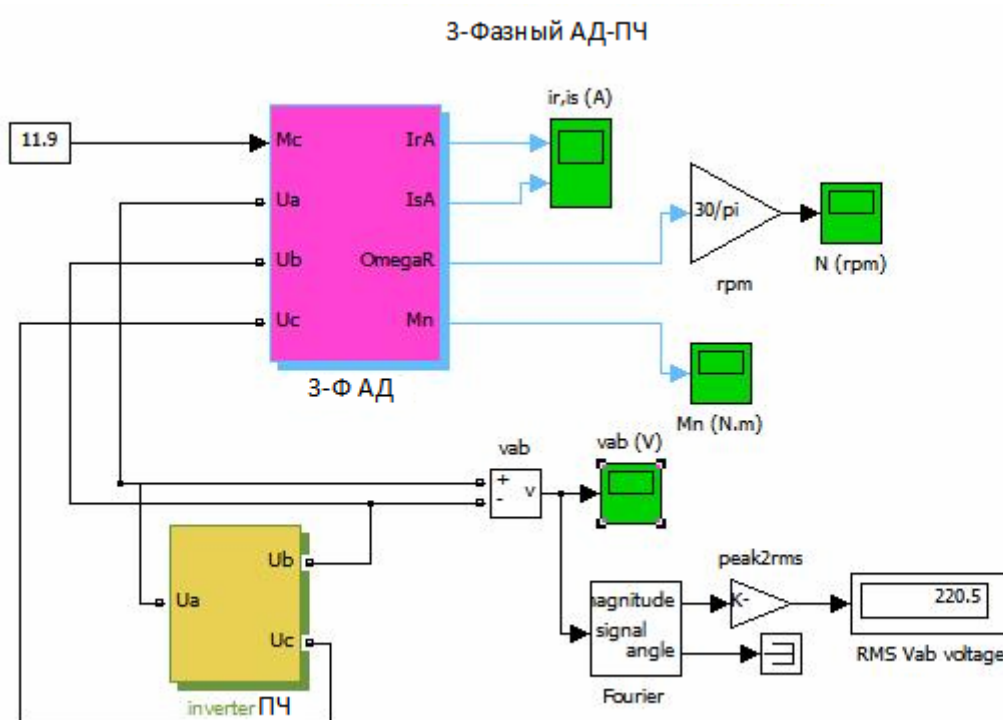


Рис 1.14. Структурная модель ПЧ-АД в среде Matlab Simulink

1.4. Формирование и регулирование выходного напряжения АИН

В частотно-регулируемом электроприводе необходимо при изменении частоты одновременно изменять и величину напряжения, подводимого к двигателю. При этом форма напряжения должна обеспечивать близкую к синусоидальной форму тока в фазах двигателя. Неблагоприятный гармонический состав фазного тока АД сопровождается дополнительными потерями, появлением паразитных моментов в высоком уровне акустических шумов в двигателе[63].

Форма выходного напряжения АИН определяется используемым алгоритмом управления силовыми элементами инвертора. Простейший алгоритм управления с $\alpha = 180^\circ$ приведен на рис.(1.15). Управляющие импульсы подаются на каждый транзистор в течение полупериода выходного напряжения. Управление транзисторами в каждой стойке производится в противофазе, а при переходе от одной стойки к другой – со сдвигом на треть периода. В результате фазное напряжение имеет форму пьедестала, а

линейное – форму прямоугольного импульса длительностью равной трети периода.

Действующее значение первой гармоники фазного напряжения:

$$U_{\phi 1} = 0.45 \cdot U_d \quad (1.12)$$

т.е. для регулирования выходного напряжения необходимо изменять напряжение U_d на входе инвертора. В силу симметрии в спектре выходного напряжения отсутствуют четные гармоники и гармоники, кратные трем.

Относительные амплитуды высших гармоник:

$$U'_{\phi k} = \frac{U_{\phi k}}{U_{\phi 1}} = \frac{1}{k} \quad (1.13)$$

Где k - номер гармоники. Например, 5-я гармоника составляет 20% от основной, 7-я гармоника – 14.4% и т.д. Поскольку АД в первом приближении можно рассматривать как фильтр нижних частот, такое распределение высших гармоник в спектре выходного напряжения является неблагоприятным. Соответственно, форма фазного тока существенно несинусоидальная и ухудшается по мере снижения частоты выходного напряжения[63].

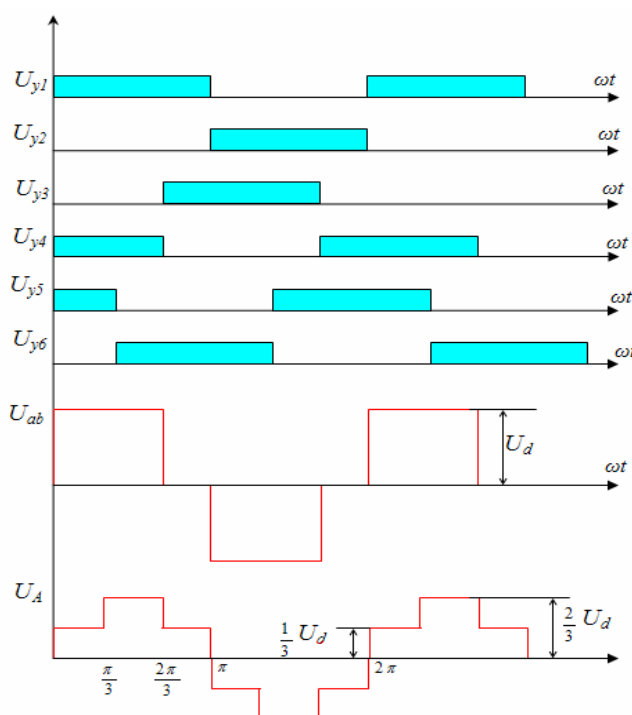


Рис.1.15. Алгоритм управления АИН с $\alpha = 180^\circ$.

Оптимальной является форма напряжения, в спектре которого отсутствуют или значительно ослаблены гармоники, прилегающие к основной. Гармоники напряжения в высокочастотной части спектра не оказывают значительного влияния на форму тока благодаря фильтрующим свойствам самого двигателя[55].

В современных ПЧ формирование и регулирование выходного напряжения АИН осуществляется методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Один из вариантов алгоритма управления с ШИМ по синусоидальному закону приведен на рис.(1.16). Штриховкой выполнены импульсы управления, подчиняющиеся закону модуляции.

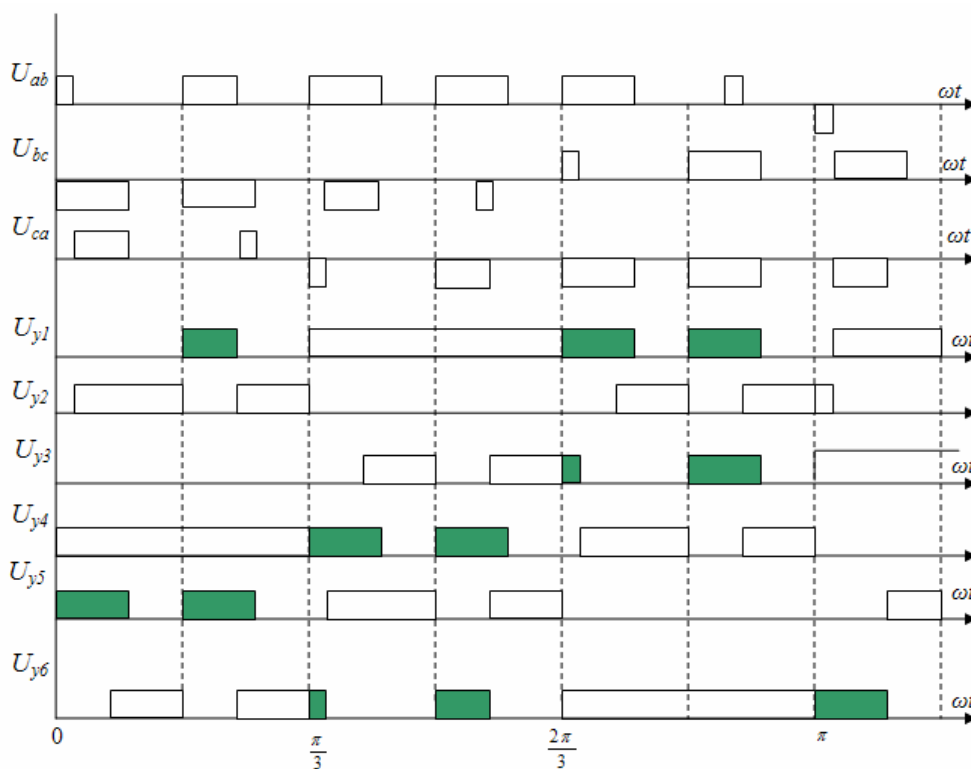


Рис.1.16. Алгоритм управления АИН с ШИМ по синусоидальному закону

Выходной (линейное) напряжение АИН представляет собой последовательность импульсов, длительность которых изменяется по синусоидальному закону. Регулирование величины напряжения осуществляется изменением длительности паузы на нуле в кривой напряжения с ШИМ. На практике для формирования алгоритма управления обычно используют специальные контроллеры ШИМ, в которых

высокочастотное напряжение пилообразной формы сравнивается с модулирующим напряжением. Частота ШИМ, определяющая число импульсов за период выходного напряжения, может достигать 10-15 кГц.

На рисунке (1.17.а,б) для сравнения приведены кривые фазного тока АД при использовании алгоритмов управления с $\alpha = 180^\circ$ и ШИМ по синусоидальному закону с числом импульсов выходного напряжения $N = 48$.

На рисунке (1.18) приведены спектры выходного напряжения АИН с $\alpha = 180^\circ$ (а) и ШИМ при $N=48$ (б) [66].

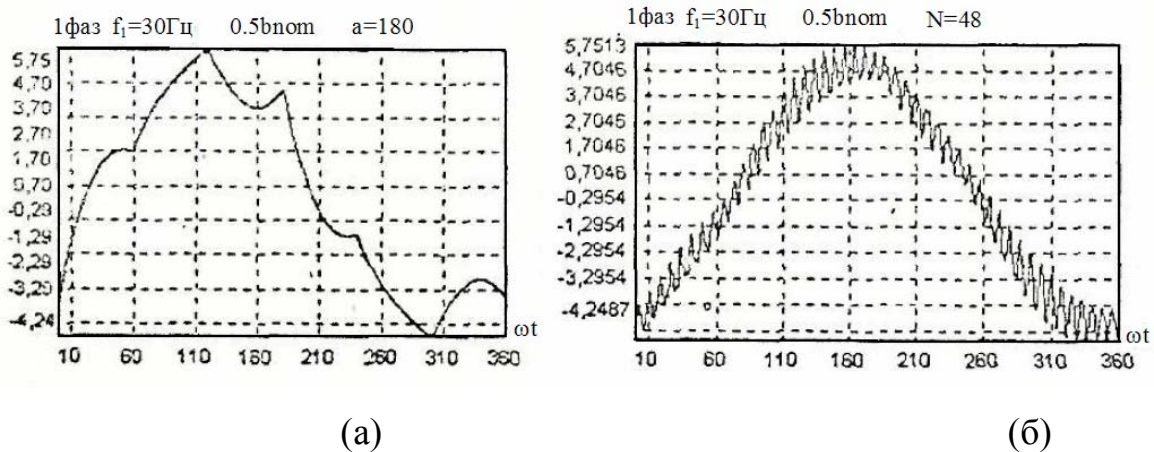


Рис. 1.17. Фазный ток АД при различных алгоритмах управления АИН

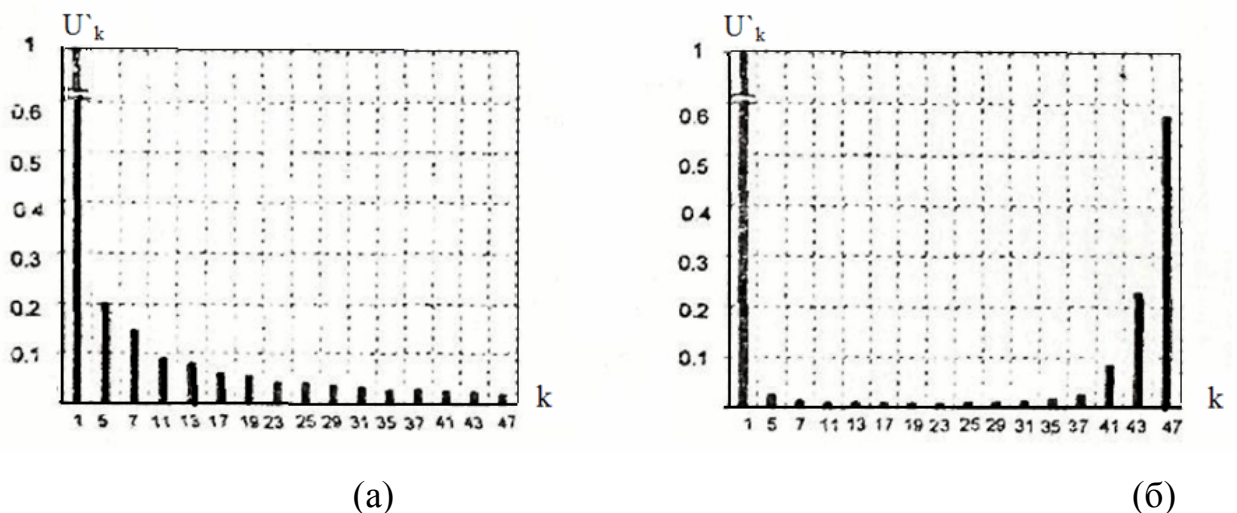


Рис.1.18. Спектральный состав напряжения АД при различных алгоритмах управления АИН

Как известно, инвертор является высших гармоник, которые создают дополнительные потери мощности в АД. Для разработки методик расчета

потерь АД с учетом высших гармоник инвертора была разработана компьютерная модель источника напряжения с ШИМ. Модель трехфазного источника напряжения с ШИМ, которая позволяет изменять несущую частоту амплитуды импульсов, показана на рис.1.20. Выходное напряжение с этой модели может быть сохранено в Matlab-файле и затем использована для дальнейших исследований[64].

Инвертор с ШИМ

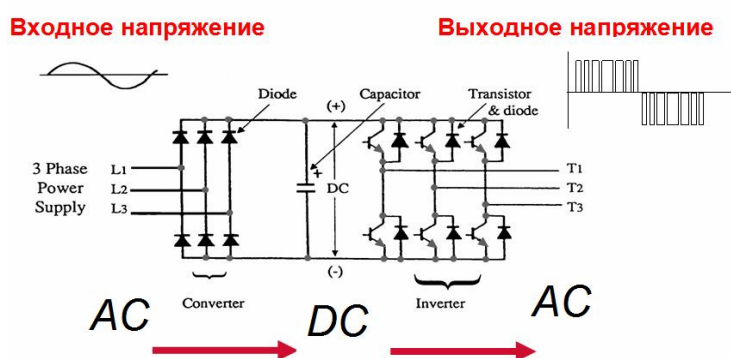


Рис 1.19. Схема инвертора напряжения

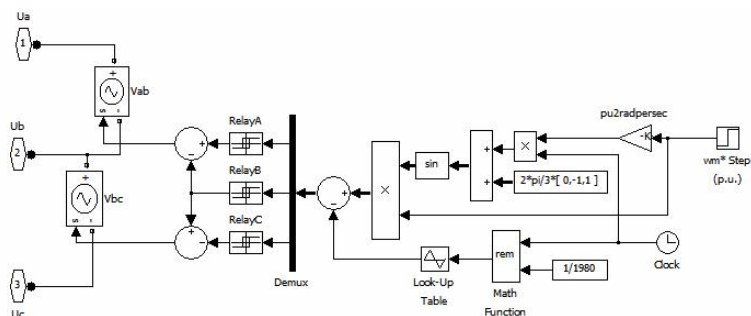
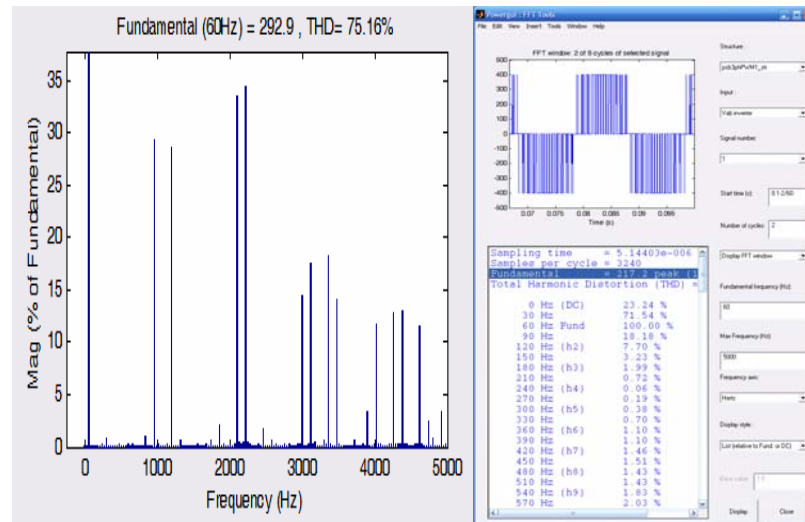


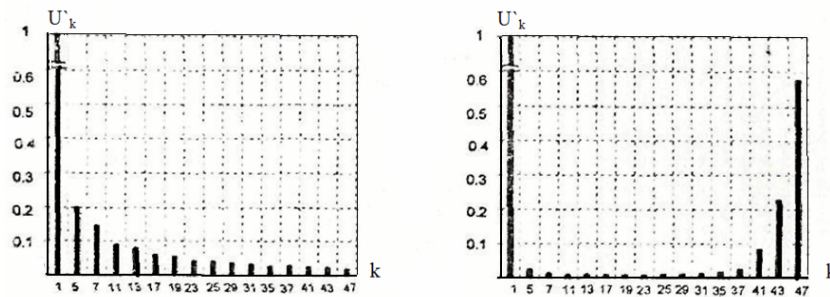
Рис 1.20. Simulink Модель АИН с ШИМ

С помощью данной модели был произведен спектральный анализ выходного напряжения. Результаты анализа показаны на рис. 1.21(а). Как видно из таблицы выходное ШИМ-напряжение представлено в виде ряда Фурье с наиболее значимыми гармониками. Такое представление удобно при моделировании переходных процессов АД[64].

В этой главе также произведено сравнение гармонического спектра инвертора с ШИМ и инвертора форма выходного напряжения, которого прямоугольная. Гармонический спектр напряжений этих инверторов показан на рис. 1.21(б).



(a)



(б)

Рис 1.21.FFT Исследование

1.5 Исследование влияния высших гармоник **ВЫХОДНОГО** напряжения инвертора

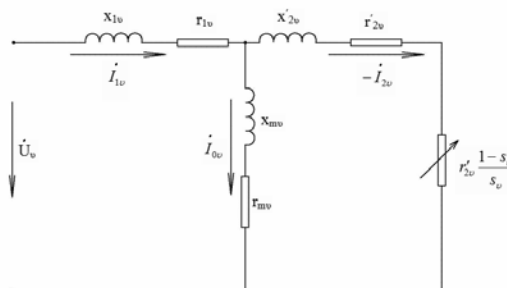


Рис 1.22. Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя при питании его несинусоидальным напряжением.

Эффект влияние высших гармоник напряжения оценивается суммарным коэффициентом искажения, который определяется как

$$K_H = \sqrt{\frac{\sum_{k=5}^{\infty} V_k^2}{V_1}} \cdot 100\% \quad (1.14)$$

где вклад k -ой гармоники определяется следующим коэффициентом влияния

$$K_V = \frac{V_k}{V_1} \cdot 100\%$$

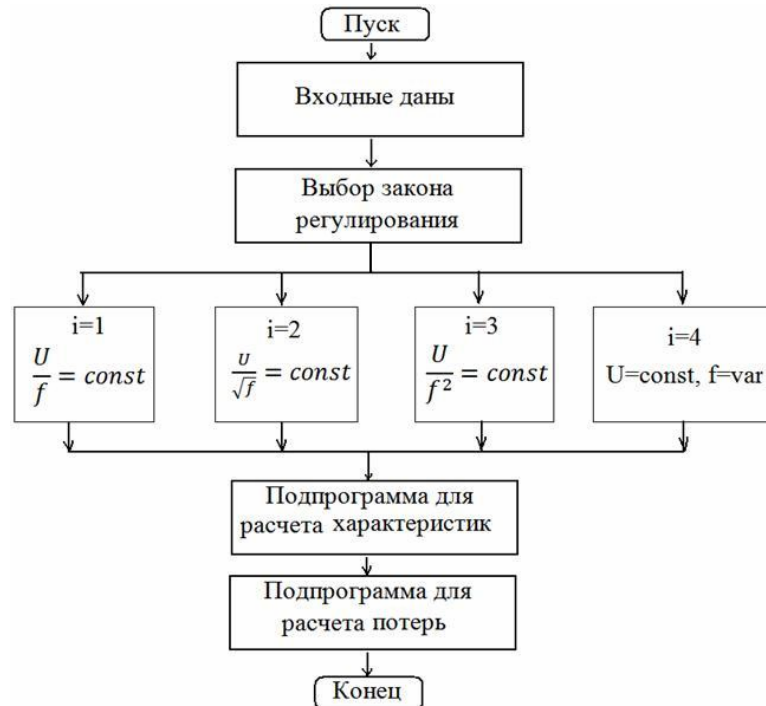


Рис 1.23. Программа расчета потерь асинхронных частотно-регулируемых двигателей

4A90L4Y3

fn	50 Гц	kpdn	0.8 oe	r10	0.098 oe
p	2 oe	kosn	0.83 oe	x10	0.076 oe
P2n	2200 Вт	Mk	2.4 oe	r20	0.06 oe
U1n	220 В	Ki	6 oe	x20	0.13 oe
sn	0.05 oe	Mr	2.1 oe	xm0	2.1 oe

Анализ приведенных зависимостей показывает, что улучшение формы тока при использовании ШИМ происходит за счет ослабления высших гармоник напряжения в низкочастотной части спектра. Число ослабленных гармоник определяется частотой ШИМ. Однако повышение частоты коммутаций силовых элементов ведет к увеличению динамических потерь в АИН. Поэтому оптимальной является частота ШИМ, при которой

обеспечиваются минимальные суммарные потери в системе инвертор-двигатель.

Для анализа влияния высших гармоник ($v=5,7,11,13,15$) на потери АД были просчитаны потери в обмотке статора и ротора, потери в стали, механические и добавочные. Результаты расчетов приведены рис 1.24-1.27, здесь величина гармоник составляет 5%, 10% и 15% от основной.

Результаты исследования эффекты высших гармоник

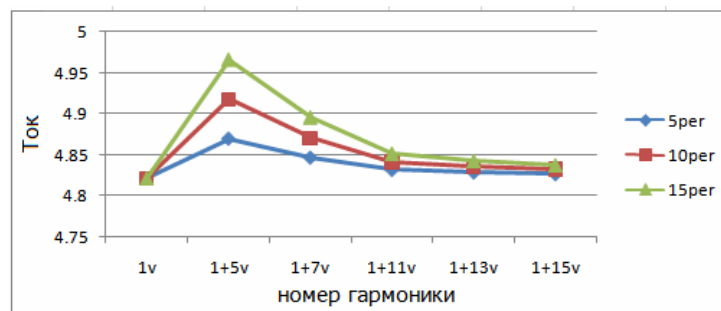


Рис 1.24.

l 1	1v	1+5v	1+7v	1+11v	1+13v	1+15v
5per	4.822	4.87	4.847	4.832	4.829	4.827
10per	4.822	4.918	4.871	4.842	4.836	4.833
15per	4.822	4.966	4.896	4.852	4.843	4.838

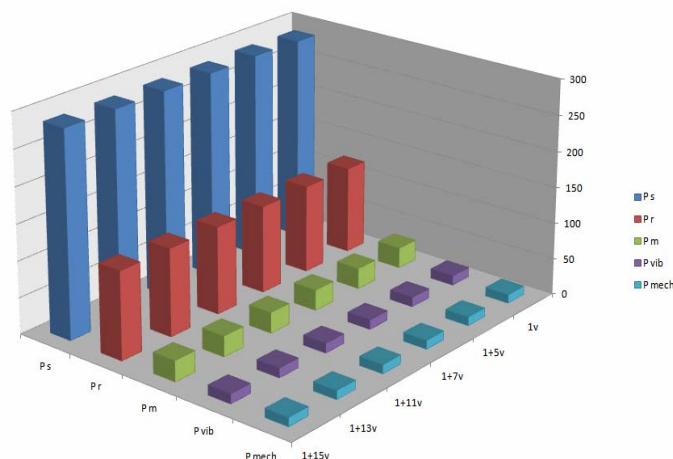


Рис 1.25.

	1v	1+5v	1+7v	1+11v	1+13v	1+15v
P s	285.327	287.025	285.774	285.401	285.365	285.348
P r	121.053	121.937	121.286	121.091	121.073	121.064
P m	28.626	28.629	28.627	28.626	28.626	28.626
P vib	13.438	13.452	13.442	13.439	13.438	13.438
P mech	12.269	12.269	12.269	12.269	12.269	12.269

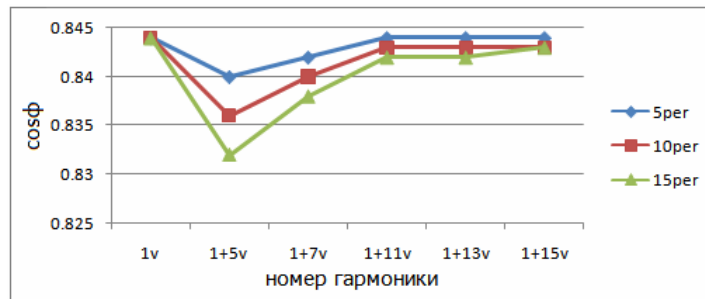


Рис 1.26.

cosφ	1v	1+5v	1+7v	1+11v	1+13v	1+15v
5per	0.844	0.84	0.842	0.844	0.844	0.844
10per	0.844	0.836	0.84	0.843	0.843	0.843
15per	0.844	0.832	0.838	0.842	0.842	0.843

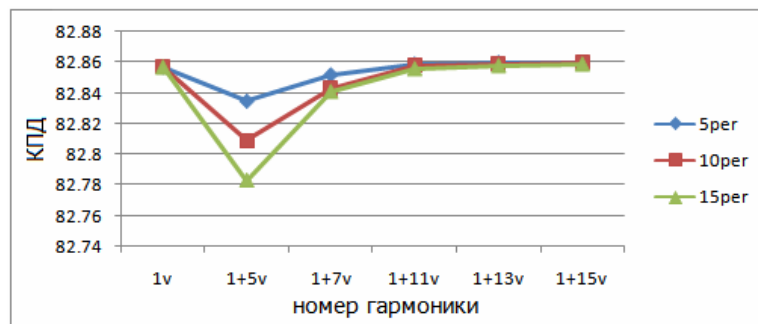


Рис 1.27.

КПД	1v	1+5v	1+7v	1+11v	1+13v	1+15v
5per	82.857	82.835	82.852	82.859	82.86	82.86
10per	82.857	82.809	82.843	82.858	82.859	82.86
15per	82.857	82.783	82.841	82.856	82.858	82.859

Влияние этих же гармоник (для процентного содержания 5%,10%,15%) на КПД показано на рис. 1.24-1.27. Как видно из приведенных кривых наибольшее влияние на КПД оказывает 5-ая гармоника напряжения инвертора, что необходимо учитывать при проектировании АД.

Выводы по главе 1.

Разработана математическая модель АИН в среде Matlab Simulink, которая позволяет получить закон изменения выходного напряжения используемый в дальнейшем для компьютерного исследования динамических процессов АД.

Исследовано влияния гармоник выходного напряжения АИН ШИМ на рабочие характеристики АД.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что улучшение формы тока при использовании ШИМ происходит за счет ослабления высших гармоник напряжения в низкочастотной части спектра. Число ослабленных гармоник определяется частотой ШИМ. Однако повышение частоты коммутаций силовых элементов ведет к увеличению динамических потерь в АИН. Поэтому оптимальной является частота ШИМ, при которой обеспечиваются минимальные суммарные потери в системе инвертор-двигатель.