

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРСПЕКТИВНОГО АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.

Ставицкий В.Н., ассистент,
Донецкий национальный технический университет

Обоснованы рациональные параметры преобразователя для асинхронного тягового привода шахтного аккумуляторного электровоза.

It is motivated correct parameters of the converter for asynchronous drive of mine locomotive.

Улучшение эксплуатационных характеристик шахтных локомотивов может быть достигнуто за счет реализации тягового привода на базе асинхронных короткозамкнутых электродвигателей (АД), оснащенных силовым полупроводниковым преобразователем. В качестве последнего предлагается схема вентильно-трансформаторного инвертора (ВТИ), позволяющая согласовать параметры напряжений аккумуляторной батареи и серийного взрывозащищенного двигателя средней мощности (рис.1).

Применение указанной схемы в тяговом приводе требует предварительного решения следующих оптимизационных задач.

Первая задача заключается в обосновании рациональных параметров схемы замещения ВТИ, а также параметров управления инвертором для условий работы в часовом режиме, характеризующемся наибольшей производительностью. Основной критерий - соответствие частоты вращения тягового АД часовой скорости привода $\omega_{\text{ч}}$. До-

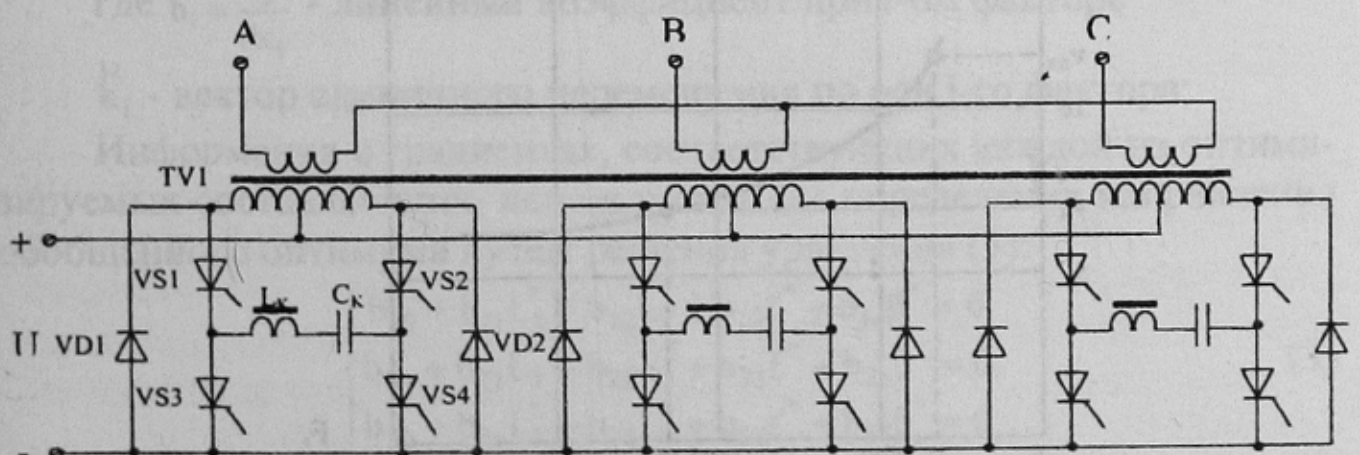


Рисунок 1 - Силовая схема трехфазного вентильно-трансформаторного инвертора

полнительными условиями являются ограничение тока, потребляемого приводом, на уровне, не превышающем базовой величины, а также ограничение рабочего магнитного потока АД на уровне номинального с целью снижения насыщения магнитной системы двигателя. В качестве независимых факторов принимаются индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора ВТИ (L_1, L_2), частота (f) и угол проводимости тиристоров (β), определяющий при фазовом регулировании действующее значение выходного напряжения.

Вторая задача состоит в обосновании рациональных соотношений параметров управления ВТИ, обеспечивающих работу привода на заданной ветви тяговой диаграммы при варьировании механической нагрузки на валу двигателя. В качестве оптимизируемых характеристик принимаются угловая частота вращения ротора приводного двигателя, определяемая базовой тяговой характеристикой электровоза (рис.2); величина потребляемого тока, ограниченная электромеханической характеристикой базового привода; а также ограничиваемая по условию насыщения величина рабочего магнитного потока. Факторами оптимизации являются частота и угол проводимости тиристоров.

Инструментом решения сформулированных задач является математическая модель электротехнической системы ВТИ-АД [1]. Однако ее непосредственное применение связано с рядом неудобств, основным из которых является отсутствие аналитических соотношений, устанавливающих связь оптимизируемых параметров с критериями оптимальности. Использование методов теории планирования эксперимента (ТПЭ) позволяет, базируясь на результатах ограниченного

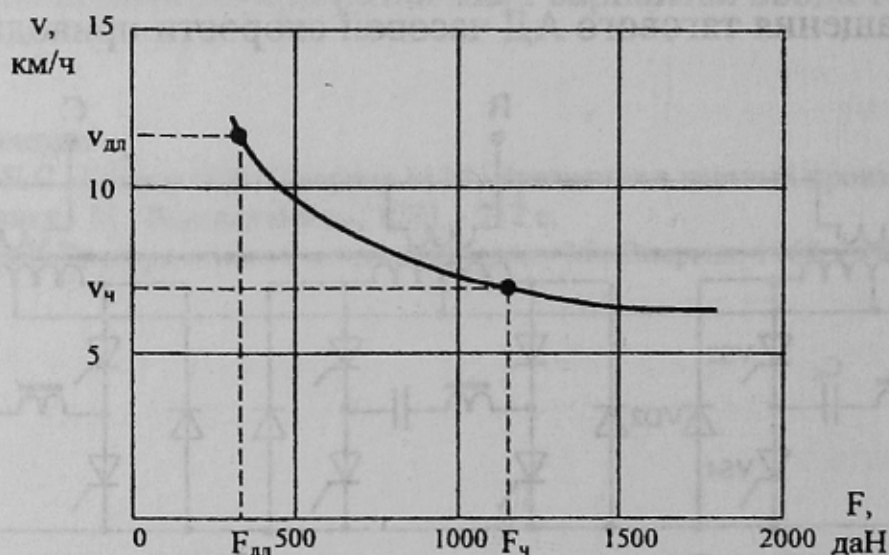


Рисунок 2 – Тяговая диаграмма электровоза АМ-8д.

количества опытов, прозеденных с помощью разработанной модели, преобразовать динамическую модель к удобной для анализа форме, непосредственно связывающей свойства системы с ее параметрами и максимально приспособленной для решения задач синтеза [2].

При решении первой из поставленных задач в качестве оптимизируемой функции принимается следующее соотношение:

$$\left[\begin{array}{l} \omega_r^*(L_1^*, L_2^*, f^*, \beta^*) \\ I_1^*(L_1^*, L_2^*, f^*, \beta^*) \\ \Psi^*(L_1^*, L_2^*, f^*, \beta^*) \end{array} \right] \rightarrow \min \quad (1)$$

где ω_r^* , I_1^* , Ψ^* - приведенные значения составляющих функции оптимизации;

L_1^* , L_2^* , f^* , β^* - приведенные значения факторов оптимизации.

Значительная ширина области допустимых значений факторов обуславливает явно выраженную нелинейность поверхности отклика [2]. В связи с этим для получения выражения, адекватно описывающего зависимость функции от величин факторов во всей области их существования, необходимо представить его в виде полинома высокой степени. Это влечет за собой необходимость проведения значительного количества опытов, повышая трудоемкость исследований и снижая наглядность полученного выражения. Аппроксимация функции отклика полиномом первой степени возможна при малой ширине интервалов варьирования. В данном случае при поиске оптимума использованы идеи, лежащие в основе метода "крутого восхождения" Бокса-Уилсона [2]. Метод заключается в перемещении по поверхности отклика в направлении ее оптимума посредством варьирования всех факторов. Направление задается градиентом оптимизируемой функции:

$$\text{grad}(y) = \sum_i b_i \cdot \overset{\vee}{k}_i \quad (2)$$

где $b_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}$ - линейный коэффициент при i -ом факторе

$\overset{\vee}{k}_i$ - вектор единичного перемещения по оси i -го фактора;

Информация о градиентах, соответствующих каждой из оптимизируемых составляющих, используется для определения направления обобщенного оптимума путем решения уравнения (3):

$$\begin{cases} b_{10} + b_{11}L_1^* + b_{12}L_2^* + b_{13}f^* + b_{14}\beta^* = 0 \\ b_{20} + b_{21}L_1^* + b_{22}L_2^* + b_{23}f^* + b_{24}\beta^* = 0 \\ b_{30} + b_{31}L_1^* + b_{32}L_2^* + b_{33}f^* + b_{34}\beta^* = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, в первую очередь осуществляется выбор узкой начальной области варьирования факторов, в которой строится план дробного факторного эксперимента (ДФЭ) 2^{4-1} [2], обеспечивающий возможность определения линейных коэффициентов при каждом из факторов; после чего проводятся опыты и обрабатываются их результаты.

После первой серии опытов получены три полинома первой степени, соответствующие оптимизируемым функциям. В результате решения системы уравнений (3) определена точка предполагаемого оптимума. Подстановка полученных данных в динамическую модель показала приближение оптимизируемых показателей к оптимальным значениям. Но в то же время имеет место значительное отклонение от оптимума. Указанные обстоятельства обусловили необходимость повторного планирования и реализации ДФЭ 2^{4-1} , приняв за основной уровень варьирования факторов значения, полученные в результате предыдущего решения.

В результате четырех этапов ДФЭ 2^{4-1} была определена около-оптимальная область факторного пространства. Уточнение координат точки оптимума потребовало более полного исследования данной области путем реализации экспериментов в соответствии с ортогональным планом второго порядка. В результате обработки экспериментальных данных получены полиномы второй степени, которые достаточно точно описывают оптимизируемые функции на исследуемом интервале варьирования факторов. Проверка по критерию Фишера точности аппроксимации функций отклика полученными полиномами свидетельствует об адекватности модели. Значимость полиномиальных коэффициентов проверялась по величине доверительного интервала.

Координаты точки оптимума были определены в результате решения системы уравнений (4):

$$\begin{cases} \omega_r^*(L_1^*, L_2^*, f^*, \beta^*) = 0 \\ I_1^*(L_1^*, L_2^*, f^*, \beta^*) = 0 \\ \Psi^*(L_1^*, L_2^*, f^*, \beta^*) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где $y_i(L_1^*, L_2^*, f^*, \beta^*)$ – полином второй степени, аппроксимирующий оптимизируемую функцию y_i^* .

В ходе решения были определены оптимальные значения факторов, соответствующие тяговому приводу с часовой мощностью 23 кВт питающемуся от аккумуляторной батареи напряжением 130 В:

$$L_1 = 0.0127 \text{ Гн};$$

$$L_2 = 0.2354 \text{ Гн};$$

$$f = 47.7 \text{ Гц};$$

$$\beta = 61.7 \text{ эл.гр.}$$

Задача обоснования рациональных соотношений параметров управления ВТИ может быть решена путем совместного применения методов ТПЭ и линейного программирования (ЛП). Использование ТПЭ позволяет получить функциональные зависимости оптимизируемых характеристик от параметров оптимизации в некоторой области их варьирования. Определение оптимальных соотношений указанных параметров производится при решении задачи поиска оптимума целевой функции методами ЛП.

В качестве оптимизируемых характеристик принимаются угловая частота вращения ротора ω_r приводного двигателя, определяемая тяговой характеристикой электровоза (рис.2); величина потребляемого тока I_1 ; величина рабочего магнитного потока Ψ . Факторами оптимизации являются частота f и угол проводимости β .

На начальном этапе производится уточнение механических координат ($M_{\text{нагр}}, \omega_r$) текущей точки тяговой диаграммы. В качестве последней принимается точка, отстоящая на величину $\Delta\omega$ от ближайшей точки с уже известными параметрами. Для нее по тяговой диаграмме определяется момент нагрузки $M_{\text{нагр}}$.

Второй этап решения заключается в построении плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) 2^2 . В качестве основного уровня варьирования факторов используются параметры, соответствующие ближайшей известной точке. Величина интервала варьирования выбирается, исходя из условий нахождения искомой точки внутри исследуемой области, а также возможности линейной аппроксимации функций отклика.

Следующий шаг – проведение экспериментов в соответствии с составленным планом, для чего используется разработанная динамическая модель системы ВТИ-АД. Результатом данного этапа являются три вектора, соответствующие различным функциям отклика. После обработки полученных данных и получения аппроксимирующего полинома производится проверка значимости полиномиальных коэффициентов и оценка точности аппроксимации.

На четвертом этапе составляются соотношения, необходимые для поиска оптимума - целевая функция (5) и ограничения (6) - (7):

$$I_1(f^*, \beta^*) \rightarrow \min \quad (5)$$

$$\omega_r(f^*, \beta^*) = \omega_r(M_{\text{нагр}}) \quad (6)$$

$$\Psi(f^*, \beta^*) \leq \Psi_{\text{доп}} \quad (7)$$

где f^*, β^* - приведенные значения факторов оптимизации.

Последующее использование методов линейного программирования позволяет определить рациональные значения факторов. В качестве инструмента решения используется система математических расчетов MathCAD [3].

Описанная методика использовалась при определении оптимальных соотношений параметров управления ВТИ во всем диапазоне скоростей, обусловленном тяговой диаграммой шахтного электроваза. В результате получены векторы взаимозависимых величин – частот f , углов проводимости β , токов I_1 , моментов M и скоростей ω_r , которые являются дискретным представлением соответствующих функциональных зависимостей. С целью получения непрерывных аналитических функций, позволяющих определить параметры управления инвертором в зависимости от режима работы привода, была проведена аппроксимация полученных данных посредством применения аппарата линейной регрессии (рис.3):

$$f(M) = 44.72 + \frac{3144}{M} \quad (8)$$

$$\beta(M) = \begin{cases} 55.65 + 0.14 \cdot f & , 43.1 \leq f < 47.7, \\ -118.11 + 3.77 \cdot f & , 47.7 \leq f \leq 56.2, \\ 97.44 - 0.07 \cdot f & , 56.2 < f \leq 77.7 \end{cases} \quad (9)$$

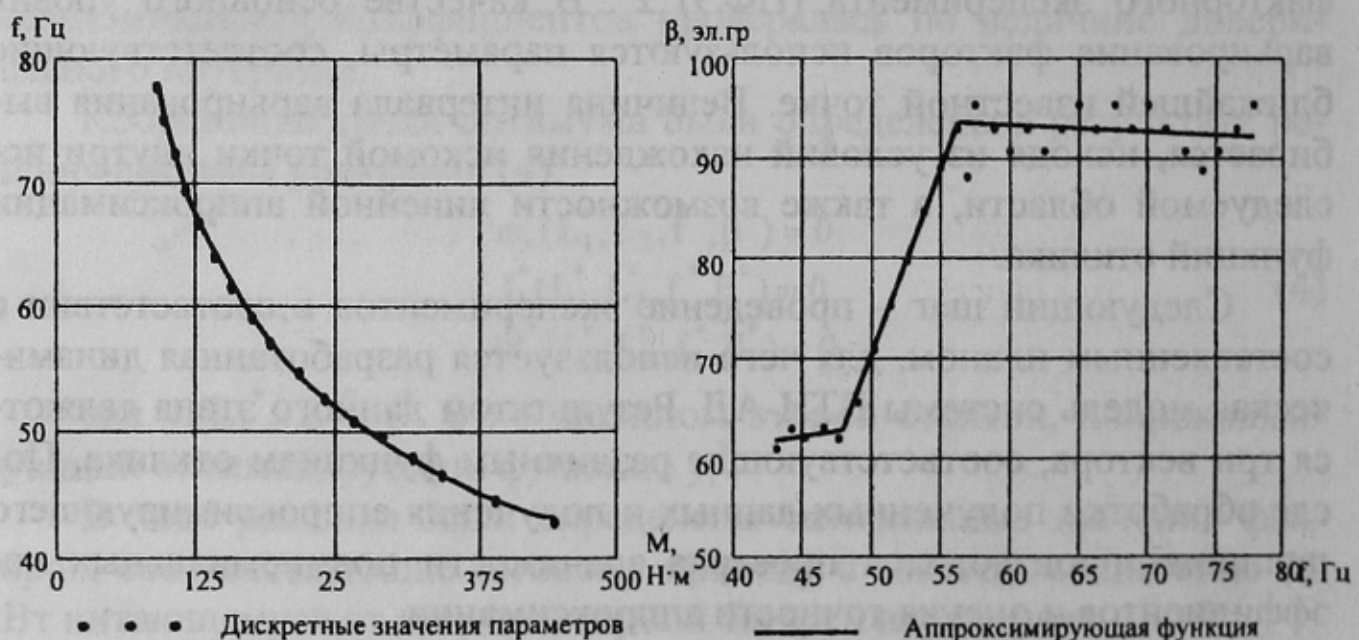


Рисунок 3 - Результаты поиска рациональных соотношений параметров регулирования системы ВТИ-АД.

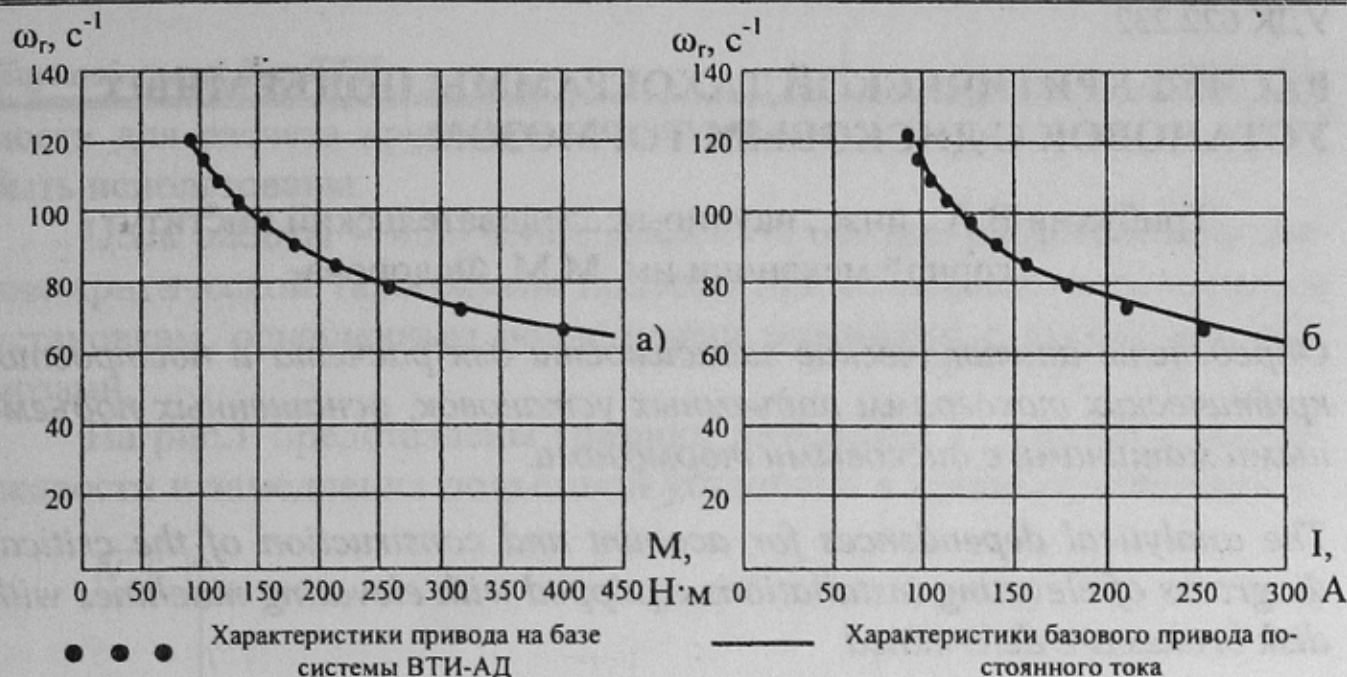


Рисунок 4 – Тяговая (а) и электромеханическая (б) характеристики приводов на базе системы ВТИ-АД и ДПТ.

Использование соотношений (8) – (9) при формировании параметров управления ВТИ позволяет получить тяговую и электромеханическую характеристики системы ВТИ-АД, приведенные на рис.4. Сопоставление характеристик, полученных расчетным путем, с фактическими зависимостями, соответствующими тяговому приводу электровоза АМ-8д с двигателями ДРТ-13, позволяет сделать вывод об идентичности тяговых и электромеханических свойств базовой и предлагаемой систем.

Таким образом, получена математическая зависимость, позволяющая определить рациональные соотношения между параметрами управления тяговым приводом на основе электротехнической системы ВТИ-АД во всем диапазоне варьирования механических координат, определяемом тяговой характеристикой привода; отличающаяся от известных учетом при ее обосновании характерных особенностей схемы автономного инвертора, а также учетом взаимного влияния асинхронного электродвигателя и вентильного преобразователя.

Список источников:

1. Ставицкий В.Н. Математическая модель процессов в электротехнической системе "вентильно-трансформаторный инвертор – асинхронный двигатель".// Труды Донецкого государственного технического университета. Выпуск 16, серия горно-электромеханическая – Донецк: ДонГТУ, 2000. – с.263-271.
2. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO, - М.: СК Пресс, 1998. – 352 с.