



УДК 313.3

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАСКАДНО-ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА И ИХ ОПТИМИЗАЦИЯ



ENERGY INDICATORS OF THE CASCADE-FREQUENCY ELECTRIC DRIVE AND THEIR OPTIMIZATION

Шишлин Денис Иванович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода,
Липецкий государственный
технический университет
denis-shishlin@yandex.ru

Платицин Егор Эдуардович

студент кафедры электропривода,
Липецкий государственный
технический университет

Аннотация. В статье представлены результаты исследований системы каскадно-частотного электропривода в плане энергетических характеристик и их оптимизация в перспективе ее применения на механизмах общепромышленного назначения.

Ключевые слова: каскадно-частотный электропривод; энергетическая; оптимизация энергетических параметров.

Shishlin Denis Ivanovich

Candidate of technical sciences,
Associate Professor,
Associate Professor
of faculty of the electric drive,
Lipetsk state technical university
denis-shishlin@yandex.ru

Platitsyn Egor Eduardovich

Student of electric drive Department,
Lipetsk state technical university

Annotation. The article presents the results of studies of the cascade-frequency electric drive system in terms of energy characteristics and their optimization in the long term of its application on general industrial mechanisms.

Keywords: cascade-frequency electric drive; energy; optimization of energy parameters.

Одним из основных направлений развития современных систем электроприводов переменного тока является частотное управление асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором на основе регулирования величины и частоты питающего напряжения [1], которое обеспечивает плавное и экономичное регулирование скорости вращения двигателей различных механизмов, составляющих примерно четвертую часть механизмов общепромышленного назначения.

Приводы турбомеханизмов с редкими пусками, длительными или медленно меняющимися режимами работы, не требующие глубокого регулирования скорости (диапазон 2:1) могут быть спроектированы на базе асинхронных двигателей с фазным ротором, включенных по схеме асинхронных вентильных каскадов (АВК). Важными достоинствами АВК являются непосредственное питание двигателя от сети и высокий КПД во всем диапазоне регулирования частоты вращения при, однако, невысоком коэффициенте мощности $\cos\varphi$ [2].

Разработка и внедрение гибридных схем на основе вышеуказанных, которые могли бы обеспечить высокие энергетические показатели, хорошую управляемость, простоту конструкции, учет требований технологического процесса, представляет собой перспективное направление развития электроприводов переменного тока.

Функциональная схема силовой части системы каскадно-частотного электропривода [3] представлена на рисунке 1.

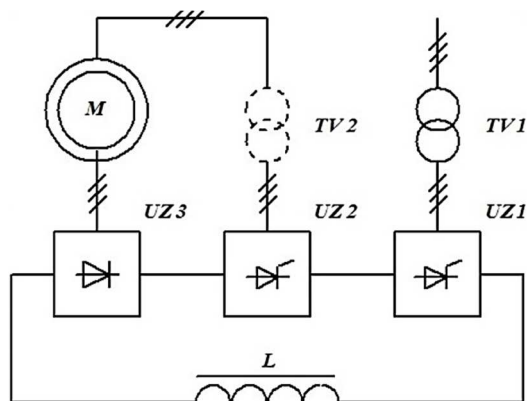


Рисунок 1 – Функциональная схема каскадно-частотного электропривода



Преобразователь UZ1, связанный с питающей сетью через трансформатор TV1 или токоограничивающий реактор LR, является регулируемым и работает в режиме выпрямителя; преобразователь UZ2 работает в режиме автономного инвертора и может быть связан с обмоткой статора через согласующий трансформатор TV2. В цепь выпрямленного тока включен сглаживающий реактор L. Асинхронный двигатель не имеет прямого включения в сеть; энергия скольжения полностью, за исключением потерь, передается в статорную цепь двигателя; регулируемый преобразователь работает в выпрямительном режиме. Обмотки статора и ротора, таким образом, оказываются включенными в общую цепь, что позволяет управлять одновременно токами, протекающими в них.

Основными энергетическими показателями электропривода являются КПД и коэффициент мощности $\cos\phi$. КПД системы определяется полезной мощностью на валу двигателя и потерями в системе, числом ступеней преобразования энергии и возможностью реализации энергии скольжения в электроприводах, где применяются асинхронные двигатели с фазным ротором. Улучшение $\cos\phi$ часто требует применения различных устройств, компенсирующих реактивную энергию, потребляемую из сети, однако это приводит к увеличению габаритов системы, снижает надежность работы и может быть рекомендовано для мощных электроприводов.

Система каскадно-частотного электропривода из питающей сети потребляет мощность $P_{ПОТР}$, которая представляет собой в сумме мощность, развиваемой на валу двигателя $M\omega$, и потерь мощности в силовой части [4]:

$$P_{ПОТР} = M\omega_0 - M\omega_0s + (\Delta P + \Delta P_{АИ}) = M\omega + (\Delta P + \Delta P_{АИ}),$$

где $M\omega_0$ – электромагнитная мощность двигателя; $M\omega_0s$ – мощность скольжения; $\Delta P = \Delta P_{ДВ} + \Delta P_{СР} + \Delta P_{НВ} + \Delta P_{ТР} + \Delta P_{РВ}$ – суммарные потери мощности в системе электропривода, соответственно в двигателе, сглаживающем реакторе, вентилях нерегулируемого выпрямителя, сетевом трансформаторе, вентилях регулируемого выпрямителя; $\Delta P_{АИ}$ – потери мощности в вентилях автономного инвертора.

Энергетическая диаграмма системы каскадно-частотного электропривода с учетом указанного баланса мощностей представлена на рисунке 2.

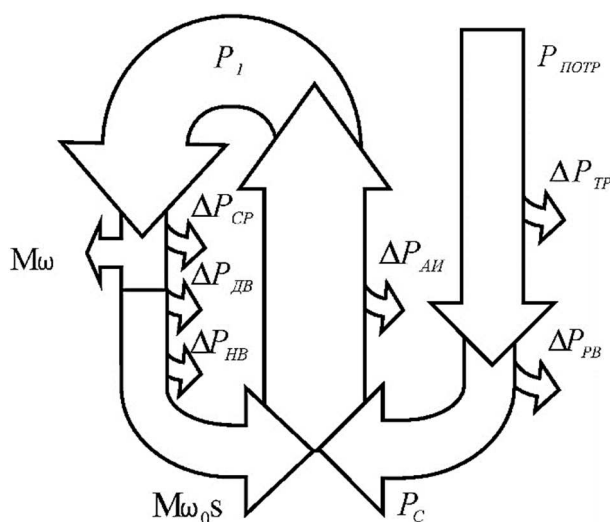


Рисунок 2 – Энергетическая диаграмма системы каскадно-частотного электропривода

Для АВК баланс мощностей определяется по формуле:

$$P'_{ПОТР} = P'_1 - M\omega_0s + \Delta P,$$

где $P'_{ПОТР}$ – мощность, потребляемая системой АВК; P'_1 – мощность, потребляемая статором двигателя. Потребляемые активные мощности в обеих рассматриваемых системах в случае использования одного и того же оборудования и равенстве развиваемого на валу двигателя момента можно принять одинаковыми.

Потребляемая системой каскадно-частотного электропривода из сети реактивная мощность определяется выражением:



$$Q_{ПОТР} = 3 \cdot E_{2T} \cdot I_d \cdot k_{СХИ} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) + \Delta Q_{ТР},$$

где $k_{СХИ}$ – коэффициент схемы соединения вентиля инвертора; для мостовой схемы $k_{СХИ} = 0,815$; $\Delta Q_{ТР}$ – часть мощности, необходимая для создания потоков рассеивания в обмотках трансформатора, α – угол управления выпрямителем; γ – угол коммутации, зависящий от тока I_d [2].

Коэффициент мощности системы каскадно-частотного электропривода определяется по формуле:

$$\cos \varphi = v \cdot \frac{P_{ПОТР}}{\sqrt{P_{ПОТР}^2 + Q_{ПОТР}^2}},$$

где v – коэффициент, учитывающий искажение формы первичных тока, потребляемого из сети; $v = 0,98$.

Таким образом, в системе каскадно-частотного электропривода мощность потребляется только трансформатором регулируемого выпрямителя, тогда как в системе АВК потребление реактивной мощности происходит и со стороны трансформатора инвертора, и со стороны статора двигателя:

$$Q'_{ПОТР} = Q'_{ДВ} + Q'_{ТР} = P'_{ДВ} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ДВ} + Q'_{ТР},$$

где $Q'_{ТР}$ – реактивная мощность, потребляемая со стороны трансформатора; $\operatorname{tg} \varphi_{ДВ}$ – тангенс угла, определяемого из схемы замещения двигателя.

Активная мощность, потребляемая АВК с учетом его кпд, равна:

$$P'_{ДВ} - P'_{ТР} = \frac{M\omega}{\eta_K}.$$

Учитывая преобразования, выполненные в [5], получаем соотношение реактивных мощностей, потребляемых системами каскадно-частотного электропривода и АВК:

$$\frac{Q'_{ПОТР}}{Q_{ПОТР}} = \left[\frac{M\omega}{\eta_K \cdot Q_{ПОТР}} + \frac{\cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)}{\sin\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right)} \right] \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ДВ} + 1.$$

Система каскадно-частотного электропривода потребляет меньше реактивной мощности, чем система АВК (на 25–30 %) и обладает более высоким $\cos \varphi$. Коэффициент мощности повышается примерно на 20 %. Кпд обеих систем за счет полезной реализации энергии скольжения остаются относительно высокими и примерно на одном уровне.

Оптимизация значений энергетических показателей электропривода представляет практический интерес, связанный с планированием режимов работы установки. Критерии, по которым производится оптимизация, могут быть различными (минимум тока статора, минимум потребляемой мощности, максимум кпд, $\cos \varphi$ и др.).

Оптимизация должна осуществляться при определенных условиях, предъявляемых к системе. Анализ энергетических характеристик каскадно-частотного электропривода проводился при наличии согласующего трансформатора в цепи статора двигателя. При этом токи в цепях статора и ротора пропорциональны между собой на величину коэффициента трансформации $k_{ТР}$. Развиваемый двигателем момент M , который является функцией произведения токов обмоток статора и ротора, возрастает.

Условием оптимизации является постоянство подводимого к статору двигателя напряжения в относительных единицах $U_1^* = \text{const}$ при различных значениях коэффициента трансформации $k_{ТР}$ согласующего трансформатора. Варьирование значения $k_{ТР}$ производилось в относительно широких пределах. В качестве допущения расчет характеристик системы электропривода проводился без учета сопротивления обмоток трансформаторного и реакторного оборудования и при неподвижном роторе двигателя. Энергетические характеристики каскадно-частотного электропривода, полученные экспериментальным путем и подтвержденные аналитическими выражениями [6], представлены на рисунке 3. Оптимальное значение коэффициента трансформации $k_{ТР}$ определено экспериментально и подтверждено расчетом численными методами.

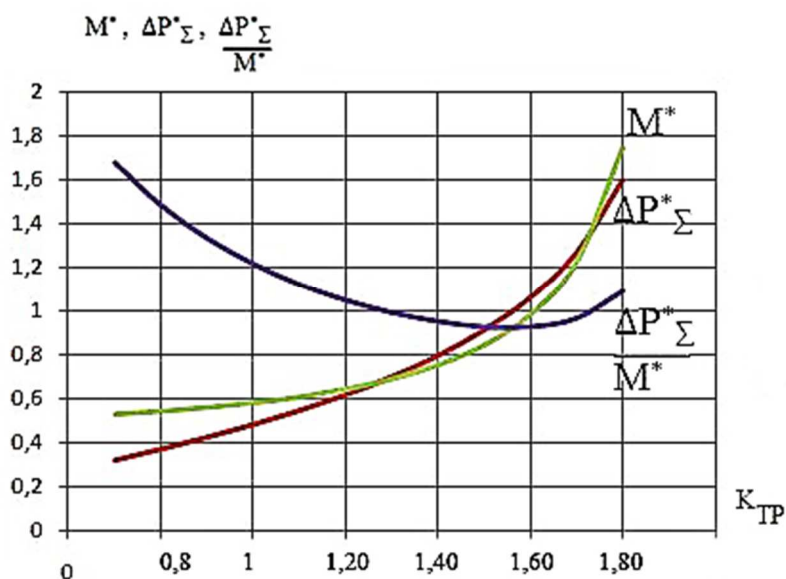


Рисунок 3 – Энергетические характеристики системы каскадно-частотного электропривода

Следовательно, при использовании согласующего трансформатора в цепи статора двигателя можно достичь увеличения его пускового момента, снижения удельных потерь энергии и увеличения КПД. На практике данное техническое решение можно применять для повышения производительности насосов, нагнетателей и других турбомеханизмов нефтегазовой отрасли.

Система каскадно-частотного электропривода при условии $M^* = \text{const}$ оптимизирована по минимальному току статора и минимуму потерь энергии, которые достигаются при меньших значениях $K_{ТР}$ [6]. Такой режим может быть рекомендован в случае минимальных нагрузок приводов (снижение расхода перекачиваемых жидкостей или газов).

Исследования системы каскадно-частотного электропривода проводились с использованием асинхронного двигателя с фазным ротором типа МТЗ11-6 [7], результаты экспериментов подтверждены расчетами и результатами математического моделирования данной системы [8]. Математическая модель каскадно-частотного электропривода позволяет рассматривать энергетические показатели как в переходных, так и в статических режимах при любых законах регулирования (при постоянном напряжении, подводимом к цепи статора асинхронного двигателя и различных значениях его частоты) и при различных законах частотного управления.

Результаты проведенных исследований для системы каскадно-частотного электропривода позволяют сделать следующие выводы:

1. Установка трансформатора в цепь статора двигателя и варьирование значения $K_{ТР}$ позволяет увеличить пусковой момент двигателя, что является важным для подъемно-транспортных и иных механизмов металлургического производства с возможностью работы «на упор», а также провести оптимизацию по минимуму удельных потерь энергии для достижения максимума КПД и, следовательно, повышения производительности механизмов.
2. В системе каскадно-частотного электропривода снижено потребление реактивной энергии из сети по сравнению с АВК, что ведет к повышению коэффициента мощности $\cos\varphi$.
3. Возможно оптимизация системы по минимуму тока потребления при фиксированных моментах нагрузки при изменении величины напряжения регулируемого выпрямителя в определенных пределах.

Литература

1. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. – М. : Академия, 2004. – 256 с.
2. Онищенко Г.Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. – М. : Энергия, 1979. – 200 с.
3. Мещеряков В.Н. Статические характеристики системы асинхронного вентильного каскада с последовательным возбуждением / В.Н. Мещеряков, Д.И. Шишлин, Р.С. Рысляев, В.А. Зотов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 2. – С. 57–60.
4. Шишлин Д.И. Составление энергетического баланса и анализ энергетических характеристик системы каскадно-частотного электропривода // сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика, энергосберегающие технологии». – Липецк : ЛГТУ, 2004. – Ч. 2. – С. 141–144.



5. Шишлин Д.И., Соловьев Р.С. Каскадно-частотный электропривод: особенности энергетики и определение энергетических показателей : Энергетика. Проблемы и перспективы развития // материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции; отв. ред. Т. И. Чернышова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019.
6. Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И. Оптимизация энергетических параметров системы каскадно-частотного электропривода механизмов металлургических производств : Современная металлургия нового тысячелетия // сборник научных трудов международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 161–167.
7. Вешневский С.Н. Характеристика двигателей в электроприводе. – М. : Энергия, 1977. – 432 с.
8. Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И. Построение математической модели системы каскадно-частотного электропривода для определения ее энергетических показателей : Энерго- и ресурсосбережение – XXI век // материалы XII Международной научно-практической интернет-конференции. – Орел, 2016. – С. 78–82.

References

1. Braslavskiy I.Ya. Energy saving asynchronous electric drive / I.Ya. Braslavskiy, Z.Sh. Ishmatov, V.N. Poliakov. – М. : Academy, 2004. – 256 p.
2. Onishchenko G.B. Asynchronous Valve Cascades and Dual Power Engines. – М. : Energia, 1979. – 200 p.
3. Meshcheryakov V.N. Static Characteristics of an Asynchronous Valve Cascade System with Post-Value Excitation / V.N. Meshcheryakov, D.I. Shishlin, R.S. Ryslyayev, V.A. Zotov // Izv. Electromechanics nika. – 2009. – № 2. – P. 57–60.
4. Shishlin D.I. Energy balance and analysis of the energy characteristics of the cascade-frequency drive system // Collection of reports of the All-Russian Scientific-Technical Conference «Electric Power Engineering, Energy-Saving Technologies». – Lipetsk : LSTU, 2004. – Part 2. – P. 141–144.
5. Shishlin D.I., Soloviev R.S. Cascade frequency electric drive: energy features and definition of energy indicators : Energetika. Problems and prospects of development // Proceedings of IV All-Russian Youth Scientific Conference; abst. of T.I. Chernyshova. – Tambov : Publishing Center FSBEI VO «TSTU», 2019.
6. Meshcheryakov V.N., Shishlin D.I. Optimization of energy parameters of the system of cascade-frequency electric drive of mechanisms of metallurgical production : Modern metallurgy of the new millennium // collection of scientific papers of the international scientific conference. – 2015. – P. 161–167.
7. Veshnevsky S.N. Characteristics of motors in electric drive. – М. : Energia, 1977. – 432 p.
8. Meshcheryakov V.N., Shishlin D.I. Construction of a mathematical model of a cascade-frequency electric drive system to determine its energy performance : Energy and resource saving – XXI century // materials of the XII International Scientific and Practical Internet Conference. – Orel, 2016. – P. 78–82.