

УДК 629.114.2.001

ЗЬОНГ ШИ ХИЕП, Д. О. ВОЛОНЦЕВИЧ**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ДВУХПОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ**

Предлагается анализ основных типов электроприводов с точки зрения целесообразности их использования в двухпоточном электромеханическом механизме поворота гусеничной машины. Сделан вывод о том, что для указанного электропривода, работающего в жестко нестационарных, повторно-кратковременных режимах, с диапазоном скоростей от отрицательных до превышающих значение синхронной скорости, испытывающего значительные кратковременные перегрузки в сочетании с ударными перегрузками по ускорениям, связанные с движением машины по пересеченной местности, наиболее целесообразно использовать трехфазный асинхронный электродвигатель с преобразователем частоты источника питания.

Ключевые слова: электропривод, электромеханический двухпоточный механизм поворота гусеничной машины, электродвигатель.

Введение.

В предыдущих публикациях авторов [1–3] были рассмотрены вопросы определения необходимой мощности электропривода для организации поворота гусеничной машины при использовании электро-механического механизма поворота. Все расчеты были представлены на примере многоцелевого гусеничного транспортера–тягача МТ-ЛБ. Однако все предыдущие выкладки не рассматривали конкретный тип электропривода, правильный выбор которого из-за специфических условий его эксплуатации может стать ключевой задачей для получения качественного и надежного механизма поворота.

Анализ состояния вопроса и постановка задачи.

Электропривод в наземных нерельсовых транспортных машинах для привода различных исполнительных механизмов применяется давно и весьма широко. Но режимы работы электродвигателей, например, стеклоподъемников или вентилятора охлаждения существенно отличаются от режима работы электродвигателя, который стал бы основой механизма поворота гусеничной машины.

Данная публикация ставит своей задачей анализ **известных** характеристик [4–6], преимуществ и недостатков основных типов тягового электропривода, применяемого в транспортных машинах, применительно к возможности создания на его основе электромеханического двухпоточного механизма поворота гусеничной машины.

Материалы исследований.**Преимущества и недостатки электрических машин постоянного тока:**

Основным преимуществом данных двигателей, которое определяло повсеместное их использование на этапе развития электрических приводов, является легкость плавного регулирования скорости в широких пределах. Поэтому с развитием полупроводниковой промышленности и появлением относительно недорогих преобразователей частоты процент использования электродвигателей постоянного тока непрерывно уменьшается. Там, где это возможно двигатели постоянного тока заменяются приводами на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Основные недостатки двигателя постоянного тока (невысокая надежность, сложность обслужива-

ния и эксплуатации) обусловлены наличием коллекторного узла. Кроме того, для питания двигателя необходим источник постоянного тока или тиристорный преобразователь переменного напряжения в постоянное. При всех своих недостатках двигатели постоянного тока обладают высоким пусковым моментом и большой перегрузочной способностью. Что определило их широкое использование в металлургической промышленности, станкостроении и на электротранспорте.

Механическая характеристика электродвигателя постоянного тока.

В результате взаимодействия тока якоря $I_{я}$ в проводнике обмотки якоря с внешним магнитным полем возникает электромагнитная сила, создающая электромагнитный момент M который приводит якорь во вращение с частотой n .

При вращении якоря пазовый проводник пересекает линии поля возбуждения с магнитной индукцией B и в соответствии с явлением электромагнитной индукции в проводнике наводится ЭДС $E_{я}$, направленная навстречу $I_{я}$. Поэтому эта ЭДС называется противо-ЭДС и она прямо пропорциональна магнитному потоку Φ и частоте вращения n :

$$E_{я} = C_e \cdot \phi \cdot n, \quad (1)$$

где C_e - постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя.

Применив второй закон Кирхгофа, получаем уравнение напряжения двигателя:

$$U = E_{я} + I_{я} \cdot \sum R, \quad (2)$$

где $\sum R$ – суммарное сопротивление обмотки якоря, включающее собственно сопротивление обмотки якоря, сопротивление добавочных полюсов и обмотки возбуждения (для двигателей с последовательным возбуждением);

$I_{я}$ – ток якоря.

Выразим из формулы (2) ток якоря:

$$I_{я} = \frac{U + E_{я}}{\sum R}, \quad (3)$$

Из формул (1) и (2) выведем формулу для частоты вращения якоря:

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e \phi}, \quad (4)$$

Электромагнитная мощность двигателя:

$$P_{ЭМ} = E_a I_a, \quad (5)$$

Электромагнитный момент:

$$M = \frac{P_{ЭМ}}{\omega}, \quad (6)$$

где ω – угловая скорость вращения якоря, определяемая через частоту вращения по формуле

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}.$$

Механические характеристики электродвигателя последовательного возбуждения

В этом двигателе обмотка возбуждения включена последовательно в цепь якоря, поэтому магнитный поток ϕ в нем зависит от тока нагрузки $I = I_a + I_e$. При небольших нагрузках магнитная система машины не насыщена и зависимость магнитного потока от тока нагрузки прямо пропорциональна, т.е. $\phi = k_\phi I_a$ (здесь k_ϕ – коэффициент пропорциональности). В этом случае электромагнитный момент (рис. 1):

$$M = C_M \phi I_a;$$

$$M = C_M k_\phi I_a I_a = C_M' I_a^2.$$

Формула частоты вращения примет вид:

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{C_e k_\phi I_a} = \frac{U - I_a \sum r}{C_e' I_a}.$$

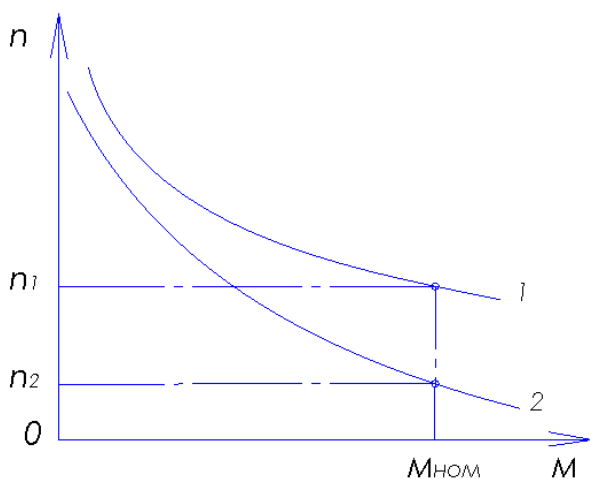


Рис. 1 – Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения:

- 1 – естественная характеристика;
- 2 – искусственная характеристика

Резко падающие кривые механических характеристик (естественная 1 и искусственная 2)

обеспечивают двигателю последовательного возбуждения устойчивую работу при любой штатной механической нагрузке. Свойство этих двигателей развивать большой вращающий момент, пропорциональный квадрату тока нагрузки, имеет большое значение особенно в тяжелых условиях пуска и при перегрузках, так как с постепенным увеличением нагрузки двигателя мощность на его входе растет медленнее, чем вращающий момент. Эта особенность двигателей последовательного возбуждения является одной из причин их широкого применения в качестве тяговых двигателей на транспорте, а также в качестве крановых двигателей в подъемных установках, т.е. во всех случаях электропривода с тяжелыми условиями пуска и сочетания значительных нагрузок на вал двигателя с малой частотой вращения.

Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

Способы регулирования частоты вращения двигателей оцениваются следующими показателями: плавностью регулирования; диапазоном регулирования, определяемым отношением наибольшей частоты вращения к наименьшей; экономичностью регулирования, определяемой стоимостью регулирующей аппаратуры и потерями электроэнергии в ней.

Из (4) следует, что регулировать частоту вращения двигателя независимого возбуждения можно изменением сопротивления в цепи якоря, изменением основного магнитного потока Φ и изменением напряжения в цепи якоря (Рис. 2).

Преимущества и недостатки машины переменного тока.

Синхронные двигатели.

Основным преимуществом данных двигателей является то, что они могут работать с коэффициентом мощности $\cos(\varphi)=1$, а в режиме перевозбуждения даже отдавать реактивную мощность в сеть, что благоприятно сказывается на характеристиках сети: увеличивается ее коэффициент мощности, уменьшаются потери и падение напряжения. Кроме того, синхронные двигатели устойчивы к колебаниям сети. Максимальный момент синхронного двигателя пропорционален напряжению, при этом момент синхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения. Следовательно, при снижении напряжения синхронный двигатель сохраняет большую перегрузочную способность, а возможность форсирования возбуждения увеличивает надежность их работы при аварийных понижениях напряжения. Большой воздушный зазор по сравнению с асинхронным двигателем и применение постоянных магнитов делает КПД синхронных двигателей выше. Их особенностью также является постоянство скорости вращения при изменении момента нагрузки на валу.

При всех достоинствах синхронного двигателя основными недостатками, ограничивающими их применение, являются сложность конструкции, наличие возбудителя, высокая цена, сложность пуска.

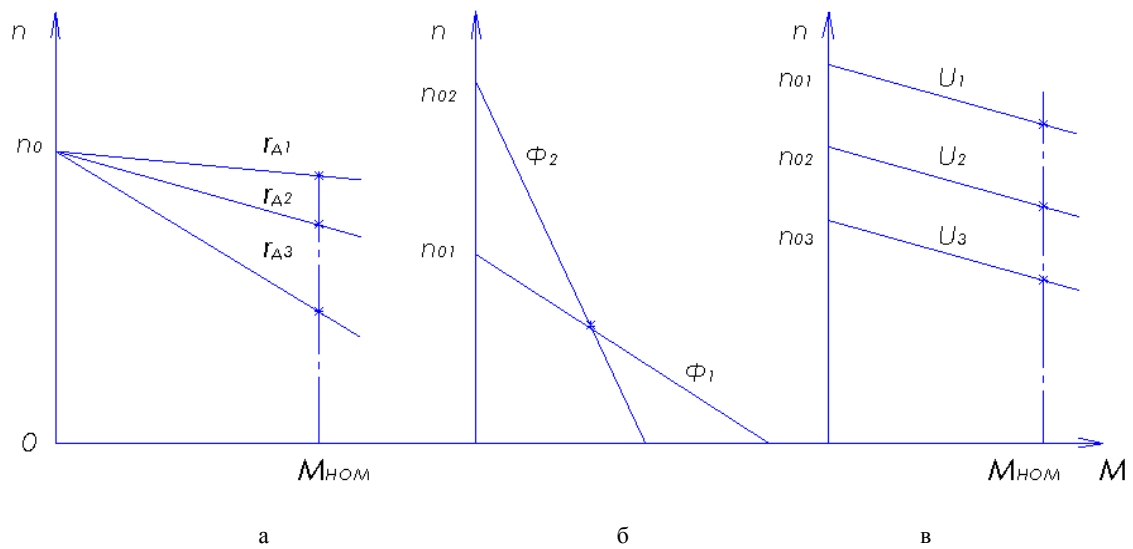


Рис. 2 – Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения:

- a – при введении в цепь якоря добавочного сопротивления ($r_{д1} = 0, r_{д2} \neq 0, r_{д3} > r_{д2}$);
- b – при изменении основного магнитного потока ($\phi_1 > \phi_2$);
- c – при изменении напряжения в цепи якоря ($U_1 > U_2 > U_3$)

Основное применение – насосы, компрессоры, вентиляторы, двигатель-генераторные установки.

Асинхронные двигатели.

Асинхронные машины получают из обобщенной машины, когда $\omega_p \neq \omega_c$. При этом поля статора и ротора неподвижны относительно друг от друга, так как частоты токов в роторе и статоре связаны между собой соотношением $f_2 = f_1 s$, где f_1 и f_2 – соответственно частоты статора и ротора. При этом s – скольжение или относительная угловая скорость (частота вращения):

$$s = \frac{\omega_c \pm \omega_p}{\omega_c}$$

Здесь угловая скорость ω_p имеет положительный знак в генераторном и тормозном режимах, в двигательном режиме ω_p имеет отрицательный знак.

В асинхронных машинах частота вращения ротора не равна частоте вращения поля в воздушном зазоре ($\omega_p \neq \omega_c$). Механическая частота вращения ротора асинхронных машин в установившемся режиме может быть ниже и выше синхронной частоты вращения поля, при этом ротор может вращаться в сторону, противоположную вращению поля.

В зависимости от частоты вращения и направления вращения ротора по отношению к полю различают четыре режима работы асинхронных машин (рис. 3). При $0 < \omega_p < \omega_c$, имеет место двигательный режим, при $\omega_c < \omega_p < +\infty$ – генераторный режим. В этом режиме ротор вращается в ту же сторону, что и поле, но с большей частотой вращения. В тормозном режиме ротор асинхронной

машины вращается в сторону, противоположную вращению поля. Когда асинхронная машина эксплуатируется при неподвижном роторе ($\omega = 0$), имеет место трансформаторный режим работы синхронной машины.

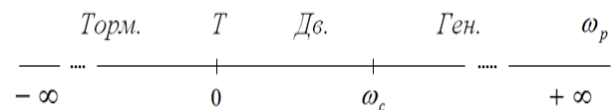


Рис. 3

Асинхронные двигатели имеют широкое применение, что, в первую очередь, обуславливается простотой в обслуживании, эксплуатации, простотой конструкции, низкой стоимостью и высокой надежностью. Что касается недостатков, то такие модели имеют малый пусковой и большой спусковой ток, чувствительны к изменениям параметров в сети, для плавного регулирования скорости необходим преобразователь частоты.

Механическая характеристика асинхронного двигателя.

Под механической характеристикой принято понимать зависимость частоты вращения ротора в функции от электромагнитного момента $n = f(M)$. Эту характеристику (рис. 4) можно получить, используя зависимость $M = f(S)$ и пересчитав частоту вращения ротора при разных значениях скольжения.

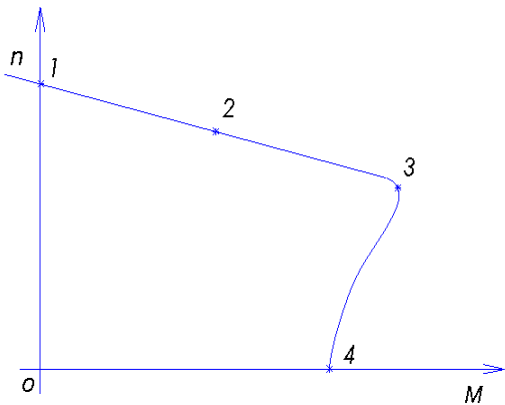


Рис. 4

Так как $S = (n_0 - n)/n_0$, откуда $n = n_0(1 - S)$.

Напомним, что $n_0 = (60f)/p$ – частота вращения магнитного поля.

Участок 1–3 соответствует устойчивой работе, участок 3–4 – неустойчивой работе. Точка 1 соответствует идеальному холостому ходу двигателя, когда $n = n_0$. Точка 2 соответствует номинальному режиму работы двигателя, ее координаты M_n и n_n . Точка 3 соответствует критическому моменту $M_{кр}$ и критической частоте вращения $n_{кр}$. Точка 4 соответствует пусковому моменту двигателя $M_{пуск}$. Механическую характеристику можно рассчитать и построить по паспортным данным.

Точка 1: $n_0 = (60f)/p$, где: p – число пар полюсов машины; f – частота сети.

Точка 2 с координатами n_n и M_n . Номинальная частота вращения n_n задается в паспорте. Номинальный момент рассчитывается по формуле:

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} = \text{Нм} \right].$$

Здесь: P_n – номинальная мощность (мощность на валу).

Точка 3 с координатами $M_{кр}$, $n_{кр}$. Критический момент рассчитывается по формуле $M_{кр} = M_n \lambda$. Перегрузочная способность λ задается в паспорте двигателя $n_{кр} = n_0(1 - S_{кр})$, $S_{кр} = S_n(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1})$, $S_n = (n_0 - n_n)/n_0$ – номинальное скольжение.

Точка 4 имеет координаты $n = 0$ и $M = M_{пуск}$. Пусковой момент вычисляют по формуле $M_{пуск} = M_n \lambda_{пуск}$. Здесь $\lambda_{пуск}$ – кратность пускового момента задается в паспорте.

Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику, т.к. частота вращения ротора (участок 1–3) мало зависит от нагрузки на валу. Это одно из достоинств этих двигателей.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.

Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей раскрывает соотношение:

$$n = (1 - S)n_0 = \frac{(1 - S)60f}{p}.$$

Отсюда следует, что при заданной нагрузке на валу частоту вращения ротора можно регулировать:

- изменением скольжения;
- изменением числа пар полюсов;
- изменением частоты источника питания.

Изменение скольжения.

На рис. 5 приведены механические характеристики асинхронного двигателя при разных сопротивлениях регулировочного реостата $R_3 > R_2 > R_1 = 0$

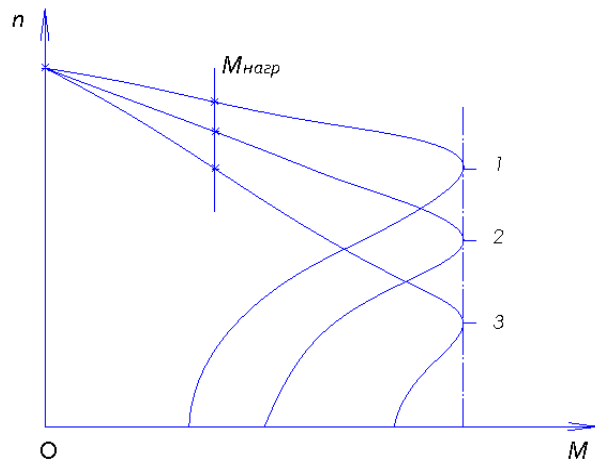


Рис. 5

Как следует из рис. 5 при этом способе можно получить большой диапазон регулирования частоты вращения в сторону понижения.

Основные недостатки этого способа:

Из-за больших потерь на регулировочном реостате снижается коэффициент полезного действия, т.е. способ неэкономичный.

Механическая характеристика асинхронного двигателя с увеличением активного сопротивления ротора становится мягче, т.е. снижается устойчивость работы двигателя.

Невозможно плавно регулировать частоту вращения.

Из-за перечисленных недостатков этот способ применяют для кратковременного снижения частоты вращения.

Изменение числа пар полюсов

Эти двигатели (многоскоростные) имеют более сложную обмотку статора, позволяющую изменять ее число пар полюсов, и короткозамкнутый ротор. При работе асинхронного двигателя необходимо, чтобы обмотки ротора и статора имели одинаковое число пар полюсов. Только короткозамкнутый ротор способен автоматически приобретать то же число пар полюсов, что и поле статора.

На рис. 6 показана схема соединения и магнитное поле статора двигателя при последовательном (б) и параллельном (а) соединении полуобмоток.

При переключении числа пар полюсов изменяется и магнитный поток в зазоре, что приводит к изменению критического момента $M_{кр}$ (рис. 7.б).

Если при изменении числа пар полюсов одновременно изменять и подведенное напряжение, то критический момент может остаться неизменным (рис. 7.а).

Поэтому при этом способе регулирования могут быть получены два вида семейства механических характеристик (рис. 7).

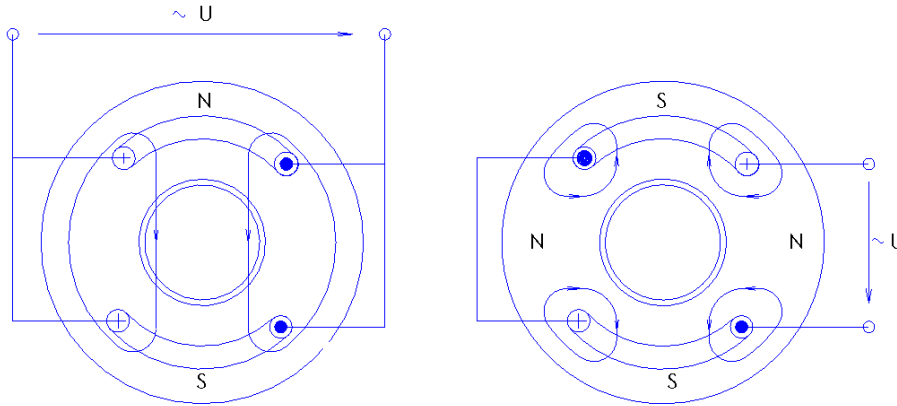


Рис. 6

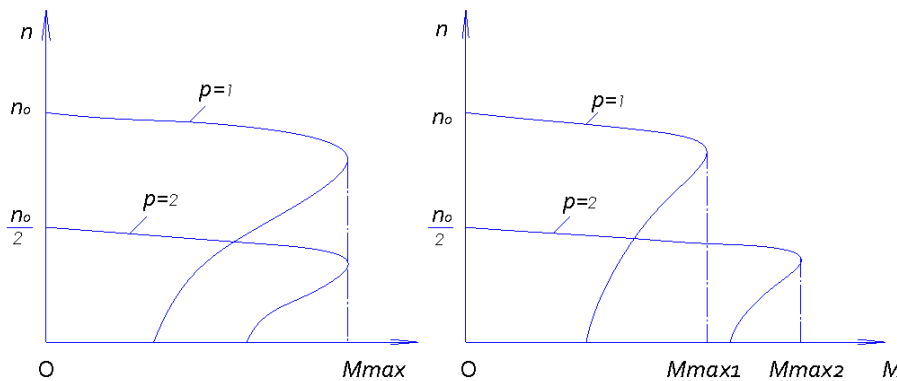


Рис. 7

Достоинства этого способа регулирования: сохранение жесткости механических характеристик, высокий КПД. Недостатки: ступенчатое регулирование, большие габариты и большая стоимость двигателя.

Изменение частоты источника питания

В качестве таких источников питания в настоящее время начали находить применение преобразователи частоты, выполняемые на мощных полупроводниковых приборах – тиристорах. Из уравнения трансформаторной ЭДС $U_1 = 4,44 w_1 k_1 f \phi$ следует, что для сохранения неизменным магнитного потока, т.е. для сохранения перегрузочной способности двигателя, необходимо вместе с частотой изменять и действующее значение подведенного напряжения. При выполнении соотношения $U_1 / f_1 = U'_1 / f'_1$, критический момент не изменяется и получается семейство механически характеристик, представленное на рис. 8.

Достоинства этого способа: плавное регулирование, возможность повышать и понижать частоту вращения, сохранение жесткости механических характеристик, экономичность. Основной недостаток

– требуется преобразователь частоты, т.е. дополнительные капитальные вложения.

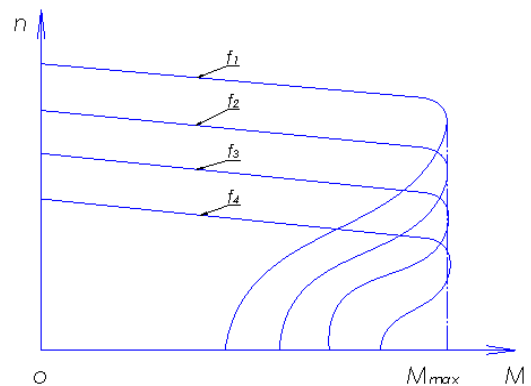


Рис. 8

Из рассмотренных типов электродвигателей за основу для дальнейшей разработки электро-механического привода механизма поворота гусеничной машины было решено выбрать трехфазный асинхронный двигатель серии АИР 132М2 с преобразователем частоты источника питания, характеристика которого представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Основные характеристики электродвигателя

Мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	Номинальная частота вращения, об/мин	Масса, кг	Кратность			КПД, %	cosφ	Число пар полюсов
				Пускового тока, Iп/In	Пускового момента, Mп/Mн	Максимального момента, Mmax/Mн			
11	3000	2895	54	7.2	2.8	3.5	88	0,9	1

Номинальное скольжение находим, зная номинальную частоту вращения:

$$n_n = \frac{(1-S)60 \cdot f}{p} = (1-S_n)n_0.$$

Тогда
$$S_n = 1 - \frac{n_n}{n_0} = 1 - \frac{2895}{3000} = 0.035.$$

Номинальный вращающий момент:

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} = 9,55 \frac{11000}{2895} = 36 \text{ Нм.}$$

Максимальный вращающий момент:

$$M_{max} = 3.5 \cdot M_n = 3,5 \cdot 36 = 126 \text{ Нм.}$$

Номинальная мощность, потребляемая из сети:

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{11}{0,88} = 12,5 \text{ кВт.}$$

Номинальный ток двигателя:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta_n} = \frac{11000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,88} = 36 \text{ А.}$$

Пусковой ток двигателя:

$$I_{п} = 7,2 \cdot I_n = 7,2 \cdot 36 = 274 \text{ А.}$$

Выводы.

Из проведенного в работе анализа для электропривода электромеханического механизма

поворота гусеничной машины, работающего в жестко нестационарных, повторно-кратковременных режимах, которые наряду с тяговыми режимами со скоростями от нуля до номинальных значений допускают переход в тормозной и генераторный режимы, значительные кратковременные перегрузки в сочетании с ударными перегрузками по ускорениям, связанные с движением машины по пересеченной местности, было принято решение о целесообразности использовать трехфазный асинхронный двигатель с преобразователем частоты источника питания.

Список литературы: 1. *Волонцевич Д. О.* Оценка необходимой мощности двухпоточного механизма поворота гусеничной машины / Д. О. Волонцевич, Н. Г. Медведев, Зыонг Ши Хуен // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. Сер.: Транспортное машиностроение. – 2014. – № 22(1065). – С. 73–83. 2. *Волонцевич Д. О.* Определение механических параметров электропривода двухпоточного механизма поворота гусеничной машины / Д. О. Волонцевич, Н. Г. Медведев, Зыонг Ши Хуен // Механiка та машинобудування. – 2014. – № 1. – С. 51–57. 3. *Volontsevich D.* Research of possibility of electromechanical turning mechanism creating for tracked vehicle as first step to hybrid transmission / D. Volontsevich., Duong Sy Hiep // International journal for science, technics and innovations for the industry: Machines, Technologies, Materials. Year IX, Issue 9/2015/ – P.55–59. 4. *Копылов И. П.* Электрические машины: Учеб. Для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк.; Логос; 2000. – 607 с. 5. Тяговые электрические машины: учеб. пособие / Ю. А. Давыдов. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 116 с. 6. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л., 1974. – 504 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Voloncevich D. O.* Ocenka neobhodimoy moshhnosti dvuhpotochnogo mehanizma povorota gusenichnoj mashiny / D. O. Voloncevich, N. G. Medvedev, Zyong Shi Hiep // Vestn. Har'k. politehn. in-ta. Ser.: Transportnoe mashinostroenie. – 2014. – No 22(1065). – P. 73–83. 2. *Voloncevich D. O.* Opredelenie mehanicheskikh parametrov jelektroprivoda dvuhpotochnogo mehanizma povorota gusenichnoj mashiny / D. O. Voloncevich, N. G. Medvedev, Zyong Shi Hiep // Mexanika ta mashynobuduvannya. – 2014. – No 1. – P. 51–57. 3. *Volontsevich D.* Research of possibility of electromechanical turning mechanism creating for tracked vehicle as first step to hybrid transmission / D. Volontsevich., Duong Sy Hiep // International journal for science, technics and innovations for the industry: Machines, Technologies, Materials. Year IX, Issue 9/2015/ – P.55–59. 4. *Kopylov I. P.* Jelektricheskie mashiny: Ucheb. Dlja vuzov. – 2-e izd., pererab. – Moscow: Vyssh. shk.; Logos; 2000. – 607 p. 5. *Tjagovye jelektricheskie mashiny: ucheb. posobie / Ju. A. Davydov.* – Habarovsk : Izd-vo DVGUPS, 2006. – 116 p. 6. *Dombrovskij V.V., Hutoreckij G.M.* Osnovy projektirovanija jelektricheskih mashin peremennogo toka. – Leningrad, 1974. – 504 p.

Поступила (received) 21.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зыонг Ши Хуен – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант; тел.: (063) 885-88-79; e-mail: syhiep1905@gmail.com.

Duong Sy Hiep – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Phd. student; тел.: (063) 885-88-79; e-mail: syhiep1905@gmail.com.

Волонцевич Дмитрий Олегович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры информационных технологий и систем колесных и гусеничных машин им. А. А. Морозова; тел.: (050) 902-73-80; e-mail: vdo_khpi@ukr.net.

Volontsevich Dmitriy Olegovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", The head of the department of information technologies and systems of wheel and track laying vehicles by A. A. Morozov; tel.: (050) 902-73-80; e-mail: vdo_khpi@ukr.net.