

Г. Х. ВЯЛЪЯМЯЭ и Х. А. ТИЙСМУС

ОГРАНИЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
МОМЕНТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКА ЭДС ХОЛЛА

ТАЛЛИН, 1958



Ер. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 150

1958

Г. Х. ВЯЛЪЯМЯЭ и Х. А. ТИЙСМУС

ОГРАНИЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
МОМЕНТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКА ЭДС ХОЛЛА

ТАЛЛИН, 1958

Ep. 231

Таллинский институт  
Технического университета  
1928

Т. А. БРАУНЕР

ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
МОМЕНТА ЭЛЕКТРОПРОВОДА  
В ПРИБЛИЖЕНИИ ДАТЧИКА ЭДС ХОЛДА

~~P37 855~~

Ep. 2331



ТАЛЛИН

## 1. Постановка задачи

В настоящее время широкое применение нашли электроприводы с использованием электромашинных усилителей, обладающих рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с другими системами.

Такие показатели, как широкий диапазон регулирования скорости, возможность осуществления различных обратных связей, надежное ограничение тока якорной цепи системы генератор — двигатель и другие обеспечили этим электроприводам успех в различных отраслях промышленности.

Однако, до сих пор не решена проблема непрерывного измерения момента электродвигателя простыми и надежными средствами.

Существуют различные лабораторные методы измерения момента, практическому внедрению которых препятствуют громоздкость и малая надежность.

Вопрос решается легко в случае двигателя постоянного тока с постоянным значением потока возбуждения, когда сигнал от тока в цепи якоря приближенно описывает электромагнитный момент двигателя.

Однако, сигнал по току не может быть применен для описания электромагнитного момента двигателя при переменном потоке возбуждения, например при регулировании скорости потоком возбуждения а также в двигателе с последовательным возбуждением.

Во многих случаях целесообразно учесть изменение потока возбуждения двигателя.

Принципиально учет изменений потока возбуждения может решаться схемными средствами путем осуществления дополнительной обратной связи по току возбуждения двигателя.

Более заманчивым является применение датчика эдс Холла, который при соответствующем включении и пространственном расположении непосредственно измеряет электромагнитный момент двигателя.

Следует заметить, что электромагнитный момент двигателя соответствует моменту на валу только в статических режимах работы привода. В динамических режимах эта пропорциональность нарушается.

В настоящей работе исследуется возможность применения датчика эдс Холла для осуществления обратной связи по электромагнитному моменту двигателя. Полученный сигнал в дальнейшем используется для ограничения момента посредством узла усиления — ограничения, построенного на полупроводниковых триодах.

## 2. Эффект Холла

Открытый в 1879 году эффект Холла стал привлекать внимание исследователей в последние годы в связи с бурным развитием науки о полупроводниках.

Разработанные на его основе приборы и устройства обладают многими замечательными и даже уникальными свойствами.

Наряду с целым рядом других применений эффект Холла должен занять определенное место и в автоматизированном электроприводе для измерения и регулирования электромагнитного момента двигателя, а также для его ограничения.

Измерение и регулирование момента необходимо произ-

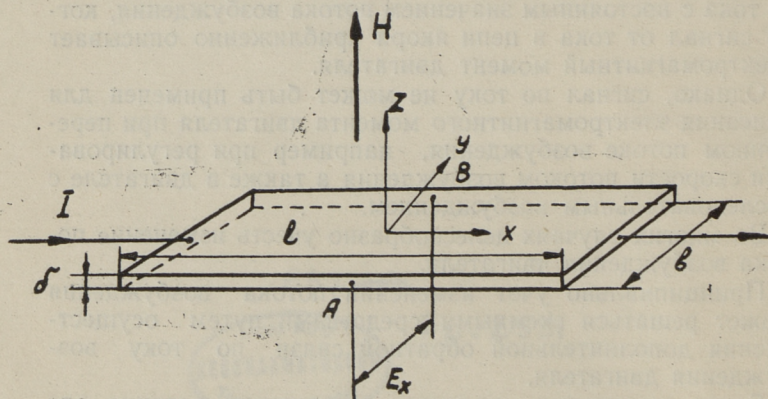


Рис. 1.

водить в различного рода мотательных механизмах, а ограничение его чаще всего встречается в приводах экскаваторного типа.

Сущность эффекта Холла заключается в следующем. Если через помещенную перпендикулярно к магнитному полю  $H$  полупроводниковую пластинку пропустить ток  $I$  вдоль оси  $x$ , то на боковых гранях по оси  $y$  возникает эдс Холла  $E_x$  (рис. 1).

Величина этой эдс определяется формулой [Л. 1]

$$E_x = R_x j H b k_x, \quad (1)$$

где  $R_x$  — постоянная Холла, характеризующая свойства полупроводника,

- $j$  — плотность тока в пластинке,
- $H$  — напряженность магнитного поля,
- $b$  — ширина пластинки,
- $k_x$  — коэффициент, зависящий от отношения длины пластинки к ее ширине.

При  $\frac{l}{b} \geq 4$  можно принять  $k_x \approx 1$ .

Из приведенной зависимости следует, что датчик Холла является электромагнитным перемножающим элементом, на выходе которого получается разность потенциалов, пропорциональная произведению напряженности магнитного поля на плотность тока.

Очевидно при других равных условиях для получения возможно большего выходного сигнала используемый полупроводник должен обладать наибольшим значением постоянной Холла.

Кроме того по практическим соображениям к датчику предъявляют требование малой зависимости постоянной Холла и его внутреннего сопротивления от температуры. Если датчик работает в нагруженном режиме, то целесообразно свести его внутреннее сопротивление к минимуму.

Для изготовления датчиков Холла могут быть использованы следующие полупроводниковые материалы: Ge, InSb, InAs, HgSe, HgTe и др. [Л. 1].

В настоящей работе использовались пленочные датчики эдс Холла на селениде ртути (HgSe), разработанные О. Д. Елпатьевской и А. Р. Регелем в Институте Полупроводников Академии Наук СССР [Л. 2].

### 3. Измерение электромагнитного момента двигателя постоянного тока датчиком эдс Холла

В статическом режиме вращающий момент электродвигателя на валу меньше электромагнитного на величину момента потерь:

$$M_d = M_{эм} - M_o. \quad (2)$$

Электромагнитный момент пропорционален произведению потока возбуждения на ток якоря:

$$M_{эм} = c\Phi I_a, \quad (3)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток двигателя,

$I_a$  — ток в цепи якоря,

$c$  — коэффициент пропорциональности.

Момент потерь в свою очередь зависит от скорости вращения двигателя. Однако, если эта зависимость выражена слабо, то в первом приближении ею можно пренебречь и учесть влияние момента потерь некоторым постоянным членом

$$M_o \approx \text{const} \quad (4)$$

Пропуская через датчик Холла ток, пропорциональный току якоря, и помещая его в магнитное поле воздушного зазора, напряженность которого пропорциональна магнитному потоку, получим на выходе напряжение, характеризующее величину электромагнитного момента двигателя.

Этот сигнал с достаточной точностью описывает также момент на валу.

Подачу токового сигнала на вход датчика можно осуществить от шунта в цепи якоря. Для использованных датчиков Института Полупроводников оказалось достаточно подать на вход падения напряжения, снимаемого с серийной обмотки возбуждения и обмотки дополнительных полюсов.

Немаловажное значение имеет выбор пространственного расположения датчика. В отличие от других авторов [Л. 3, 4] нами рассмотрен вариант размещения датчика между полюсом и ярмом машины, что обеспечивает:

- 1) защиту от механических повреждений и
- 2) меньшее влияние реакции якоря.

Экспериментальное исследование проведено на машине



мв  $E_x$  Режимы двигателя:

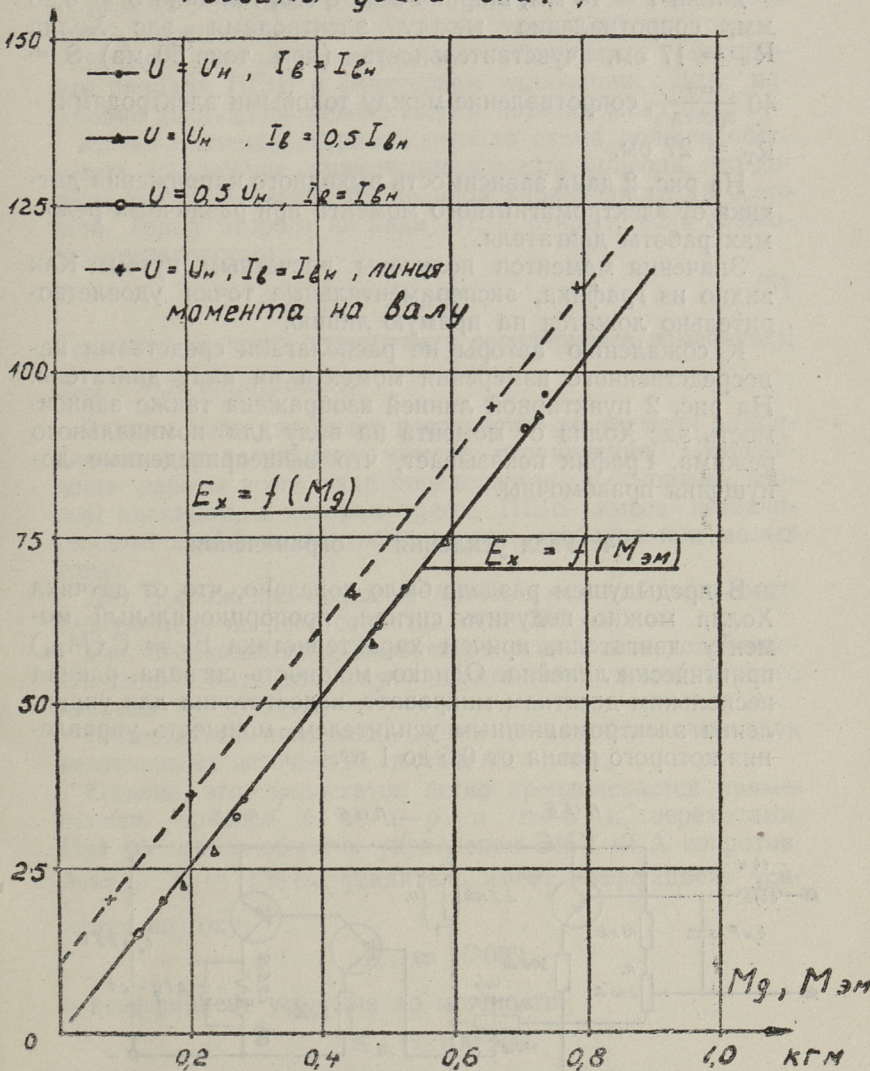


Рис. 2.

ПНФ-10 с использованием пленочного датчика из селенида ртути на слюдяной основе со следующими данными: длина  $l = 18$  мм, ширина  $b = 8$  мм, толщина  $\delta = 0,05$  мм, сопротивление между электродами эдс Холла  $R_H = 17$  ом, чувствительность (при токе 50 ма)  $S = 40 \frac{\text{мкВ}}{\text{эрстед}}$ , сопротивление между токовыми электродами  $R_T = 27$  ом.

На рис. 2 дана зависимость выходного напряжения датчика от электромагнитного момента при различных режимах работы двигателя.

Значения моментов получены расчетным путем. Как видно из графика, экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на прямую линию.

К сожалению авторы не располагали средствами непосредственного измерения момента на валу двигателя. На рис. 2 пунктирной линией изображена также зависимость эдс Холла от момента на валу для номинального режима. График показывает, что вышеприведенные допущения правомочны.

#### 4. Узел усиления — ограничения

В предыдущем разделе было показано, что от датчика Холла можно получить сигнал, пропорциональный моменту двигателя, причем характеристика  $E_x = f(M_{эм})$  практически линейна. Однако, мощность сигнала, равная нескольким десяткам микроватт, недостаточна для управления электромашинным усилителем, мощность управления которого равна от 0,5 до 1 вт.

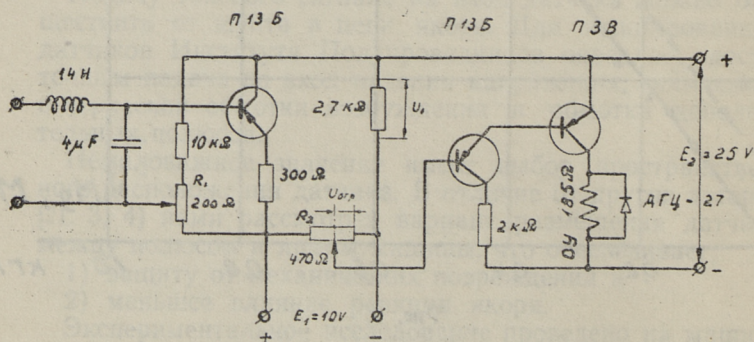


Рис. 3.

Разработанная нами схема полупроводникового усилителя показана на рис. 3.

На вход усилителя включен фильтр LC для подавления помех, наведенных коллекторной пульсацией машин.

Входной сигнал первоначально усиливается германиевым триодом ПЗБ в эмиттерном включении. Для настройки на нужный режим введен потенциометр  $R_1$ .

Кроме усиления входного сигнала схема должна обеспечить и надежное ограничение момента привода, что достигается существенно нелинейной характеристикой всего узла. Триод второго каскада ПЗБ открыт, если соблюдено неравенство:

$$|U_1| > |U_{огр}| \quad (5)$$

Величина момента ограничения регулируется изменением  $U_{огр}$  потенциометром  $R_2$ .

Важное значение имеет постоянство во времени напряжения, определяющего момент ограничения. Стабильность работы всего узла определяется, в основном, первым каскадом, в котором триод ПЗБ имеет незначительный дрейф коллекторного тока, особенно при малых токах.

Для достижения большей устойчивости работы в эмиттерную цепь введено сопротивление 300 ом.

При необходимости, дальнейшее повышение устойчивости может быть достигнуто двухтактной схемой первого каскада.

Недостатком описанной схемы является наличие двух независимых источников постоянного тока.

Однако, этот недостаток легко преодолевается применением триодов с р—п—р и п—р—п переходами. При работе на обмотку управления ЭМУ-12 А сопротивлением  $r_m = 185$  ом усилитель имеет коэффициент усиления по току

$$K_i \cong 10\,000$$

и коэффициент усиления по мощности

$$K_p \cong 100\,000.$$

Мощность триода ПЗБ достаточна для питания управляющей обмотки ЭМУ, параллельно которой включен

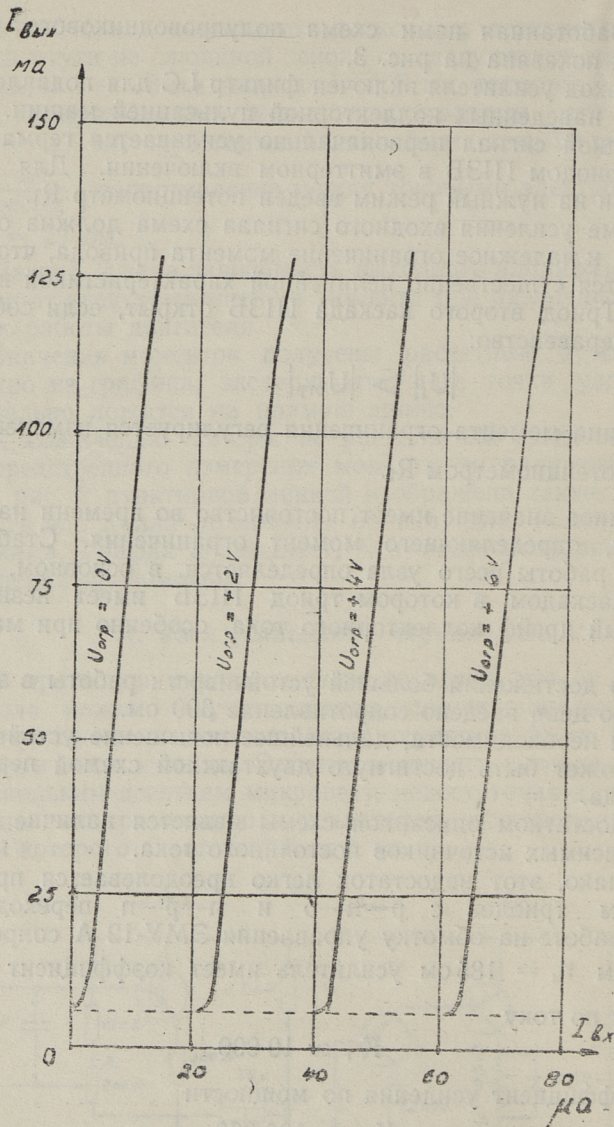


Рис. 4.

диод ДГЦ-27 для защиты триода от опасных перенапряжений, могущих возникнуть при переходных процессах.

Характеристики узла усиления — ограничения приведены на рис. 4 для различных значений ограничивающего напряжения  $U_{огр}$ .

### 5. Принципиальная схема и характеристики электропривода с обратной связью по электромагнитному моменту

Разработанная схема электропривода изображена на рис. 5. Электромашинный усилитель ЭМУ-12 А работает в качестве генератора. Регулирование скорости производится напряжением на зажимах якорной обмотки двигателя ПНФ-10 с независимым возбуждением. Нагрузочный момент на валу двигателя имитирован нагрузочным генератором ПНФ-10, работающим на сопротивление.

Для получения большей жесткости механической характеристики при нагрузках, не превышающих номинальной, применена обратная связь по эдс двигателя, включенная навстречу задающей обмотке и осуществленная через линейный мост.

Известно, что при соответствующем подборе  $R_1$  напряжение на диагонали моста пропорционально эдс двигателя, т. е. скорости его вращения.

Суммарное сопротивление добавочной и серийной обмоток  $R_{дл} + R_{сл}$ , являющееся одним плечом моста, служит также для получения токового сигнала, подаваемого на вход датчика Холла. Так как магнитный поток возбуждения пронизывает датчик перпендикулярно его плоскости в зазоре между ярмом и полюсом, то выходное напряжение пропорционально произведению тока якоря на магнитный поток возбуждения, т. е. электромагнитному моменту. Полученный сигнал подается на узел усиления-ограничения. Если входной сигнал этого узла не превышает заданного значения, ток в обмотке управления ЭМУ очень мал и токовая обмотка на режим работы привода существенно не влияет. По превышении определенного значения входной сигнал вызывает резкое возрастание тока в обмотке управления ЭМУ, включенной навстречу задающей обмотке. Происходит размагничивание ЭМУ и резкое снижение скорости вращения двигателя.

Система должна обладать т. н. экскаваторной характеристикой, необходимой при работе привода на упор.

Заметим, что узел усиления-ограничения имеет весьма малые размеры и может разместиться в клемной коробке двигателя.

При выводе общего уравнения механической характеристики привода приняты обычные допущения, а именно:

1. Постоянство скорости вращения приводного двигателя ЭМУ,
2. постоянство параметров всех цепей и узлов,
3. полная компенсация реакции якоря ЭМУ,
4. отсутствие петли гистерезиса,
5. прямолинейность кривой намагничивания.

Примем также следующие обозначения величин:

- $I_d$  — ток цепи якорей привода,
- $i_s, i_c, i_m$  — токи в обмотках управления ЭМУ,
- $w_s, w_c, w_m$  — числа витков соответственно задающей, скоростной и моментной обмоток управления,
- $r_{s\Sigma}, r_{e\Sigma}, r_{m\Sigma}$  — суммарные сопротивления соответствующих цепей,
- $E_g$  — электродвижущая сила генератора,
- $E_d$  — электродвижущая сила двигателя,
- $aw_\Sigma$  — суммарные ампервитки возбуждения генератора,
- $K$  — коэффициент пропорциональности между суммарными ампервитками и эдс генератора  $E$ ,
- $R = R_d + R_r$  — суммарные сопротивления цепи якорей,
- $R_d$  — сопротивление якорной цепи двигателя,
- $R_r$  — сопротивление якорной цепи генератора (ЭМУ),
- $n$  — скорость вращения двигателя,
- $c_e$  — коэффициент пропорциональности между эдс и скоростью двигателя.

В установившемся режиме работы привода справедливы следующие уравнения:

$$E_g = E_d + I_d R = c_e n + I_d R \dots \dots \dots (6)$$

$$aw_\Sigma = w_s i_s - w_c i_c - w_m i_m \dots \dots \dots (7)$$

$$E_r = K a w_\Sigma \dots \dots \dots (8)$$

Согласно характеристике узла усиления-ограничения, сигнал обратной связи по моменту обусловлен разностью величин  $СМ_d - E_{xo}$ , где  $С$  — коэффициент пропорциональности между эдс и моментом и  $E_{xo}$  — величина напряжения, при которой вступает в работу обратная связь по моменту.

Обозначим через

$$K_3 = K \frac{w_3}{\Gamma_3 \Sigma} \text{ — коэффициент усиления задающей обмотки,}$$

$$K_c = \beta K \frac{w_c}{\Gamma_c \Sigma} \text{ — коэффициент усиления обмотки обратной связи по скорости,}$$

$$K_m = K \frac{w_m}{\Gamma_m \Sigma} \text{ — коэффициент усиления обмотки обратной связи по моменту,}$$

$\beta$  — передаточный коэффициент моста.

Выражение эдс генератора примет вид:

$$E_r = K_3 U_3 - K_c E_d - K_m СМ_d + K_m E_{xo} \dots \dots (9)$$

После несложных преобразований [Л. 5] получим общее уравнение механической характеристики привода

$$n = \frac{K_3 U_3 + K_m E_{xo}}{c_e (1 + K_c)} - \frac{M_d}{c_e c_m} \frac{K_m C + R}{1 + K_c} \quad (10)$$

Уравнение (10) выведено в предположении, что работают все обратные связи. Таким образом оно описывает режим ограничения момента. При нагрузке, не превышающей ограниченного значения момента, обратная связь по моменту не работает и в уравнении (10) можно полагать

$$K_m = 0. \quad (11)$$

В этом случае уравнение

$$n = \frac{K_3 U_3}{c_e (1 + K_c)} - \frac{M_d}{c_e c_m} \frac{R}{1 + K_c} \quad (12)$$

описывает жесткий участок механической характеристики, что очевидно из неравенства (13) и (14):

$$\frac{K_M C + R}{1 + K_c} \gg \frac{R}{1 + K_c} \quad (13)$$

$$\frac{K_3 U_3 + K_M E_{X0}}{c_e (1 + K_c)} > \frac{K_3 U_3}{c_e (1 + K_c)}, \quad (14)$$

так как  $C$  содержит весьма большой коэффициент усиления полупроводникового усилителя в обратной связи по моменту.

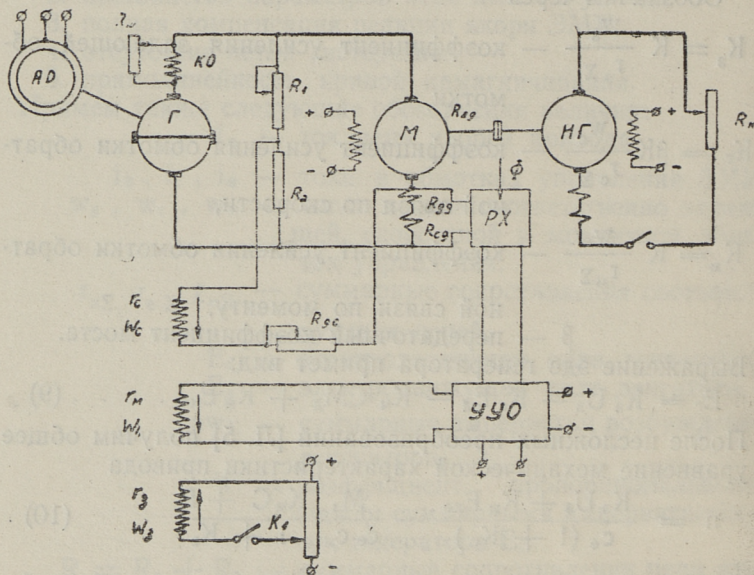


Рис. 5.

Результаты изложенного анализа были проверены на экспериментальной установке по схеме рис. 5. Статические характеристики предлагаемого привода для различных режимов работы даны на рис. 6. Цифрами 1—3 обозначены характеристики, соответствующие наложенной обратной связи по скорости, но без ограничения момента. Характеристики 1—5 соответствуют режиму с наложенной обратной связью по скорости и с ограничением момента. Разомкнутая система управления описывается характеристиками 2—4. Кривые 2—6 изображают влияние



наложения ограничения момента на разомкнутую систему управления.

Жесткость нижней характеристики 1—3 свидетельствует о значительном диапазоне регулирования скорости, достигающем 40—50, без специальных мероприятий для его расширения. Ограничение момента происходит достаточно резко, причем более резко в разомкнутой системе управления. Это закономерно, так как при наложенной обратной связи по скорости узел усиления-ограничения должен нейтрализовать большие ампервитки задающей обмотки при снижении скорости привода.

Для выяснения некоторых динамических характеристик исследуемого привода заосциллографирован процесс

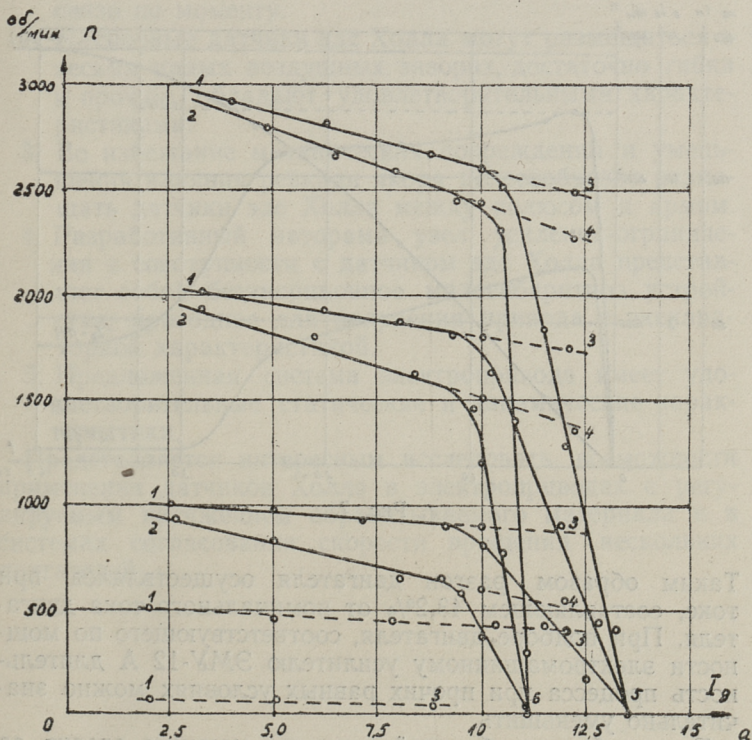


Рис. 6.

пуска путем подачи скачкообразного напряжения на задающую обмотку через выключатель  $K_1$  (рис. 5).

Коэффициент форсировки по возбуждению равнялся 2.

На рис. 7 показано изменение тока цепи якорей, скорости и тока обмотки обратной связи по моменту во времени в процессе пуска двигателя на номинальный режим.

Переходный процесс пуска кончается практически в течение 3,3 секунды. Чрезвычайно большая длительность его объясняется тем, что номинальный ток электромашинного усилителя ЭМУ-12 равен 10,2 а, а номинальный ток двигателя ПНФ-10 составляет 26,6 а.

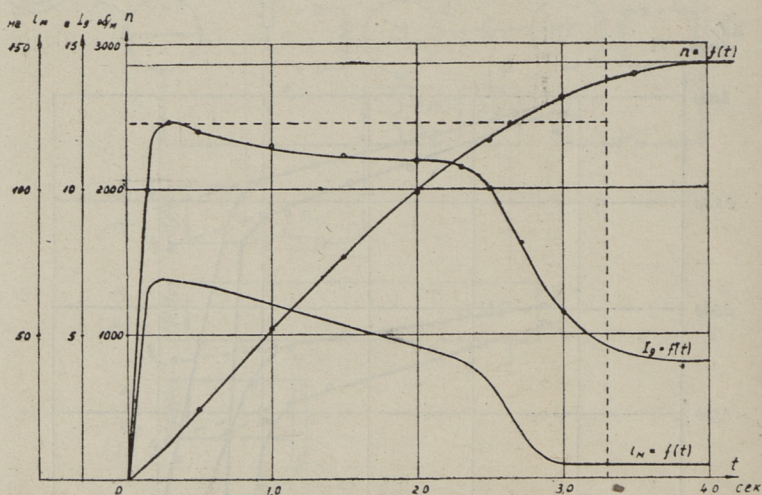


Рис. 7.

Таким образом разгон двигателя осуществлялся при токе, составляющем 43,2% от номинального тока двигателя. При подборе двигателя, соответствующего по мощности электромашинному усилителю ЭМУ-12 А длительность процесса при прочих равных условиях можно значительно уменьшить.

Ток в обмотке обратной связи по моменту следит за током в главной цепи, что вполне закономерно при постоянном возбуждении двигателя.

Процесс установления скорости  $n = f(t)$  происходит по аperiodическому закону, что обусловлено хорошим заполнением графика тока  $I = f_1(t)$ , составляющим около 82%.

## 6. Выводы и рекомендации

На основании полученных результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Пленочные датчики эдс Холла, разработанные Институтом Полупроводников АН СССР могут и должны найти практическое применение в автоматизированных электроприводах, нуждающихся в обратной связи по моменту.
2. Пленочные датчики эдс Холла могут размещаться в весьма малых воздушных зазорах, достаточно гибки и прочны, обладают удовлетворительными характеристиками.
3. Во избежание механических повреждений и уменьшения влияния реакции якоря целесообразно размещать датчики эдс Холла между полюсом и ярмом.
4. Разработанный авторами узел усиления-ограничения в совокупности с датчиком эдс Холла представляет собой безинерционное малогабаритное устройство, пригодное для получения привода с экскаваторной характеристикой.
5. Предложенная система электропривода имеет удовлетворительные статические и динамические характеристики.

Представляется интересным исследовать возможности применения датчиков Холла в электроприводах с регулируемым натяжением обрабатываемого материала и в системах согласования скорости вращения нескольких двигателей.



## ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Жузе, А. Р. Регель, Технические применения эффекта Холла, Ленинград, 1957.
2. О. Д. Елпатьевская и А. Р. Регель, О некоторых возможностях измерения напряженности магнитного поля плечевыми датчиками эдс Холла, изготовленными из Hg Se, Hg Te и их твердых растворов. ЖТФ 26, 1956, 2432.
3. F. K u h r t, E. V g a u p e r s g e u t h e r, Drehmomentmessung an einem Gleichstrommotor mit Hilfe des Halleffektes, Siemens-Zeitschrift, 28, 1954, 299.
4. О. Д. Елпатьевская, В. А. Перчук, Осциллографирование электромагнитного момента в электрических машинах постоянного тока с помощью эффекта Холла в полупроводниках, ЖТФ, 27, 1957, 1535.
5. Х. А. Тийсмус, Ограничение момента электропривода при помощи нелинейного моста, Труды ТПИ, Серия А, № 99, Таллин, 1957.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
1. Постановка задачи . . . . .	3
2. Эффект Холла . . . . .	4
3. Измерение электромагнитного момента двигателя постоянного тока датчиком эдс Холла . . . . .	6
4. Узел усиления-ограничения . . . . .	8
5. Принципиальная схема и характеристики электропривода с обратной связью по электромагнитному моменту . . . . .	11
6. Выводы и рекомендации . . . . .	17
Л и т е р а т у р а . . . . .	18



Г. Х. Вяльмяэ и Х. А. Тийсмус

ОГРАНИЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКА ЭДС ХОЛЛА

Таллинский Политехнический Институт

\*

Редактор Х. С и л л а м а а

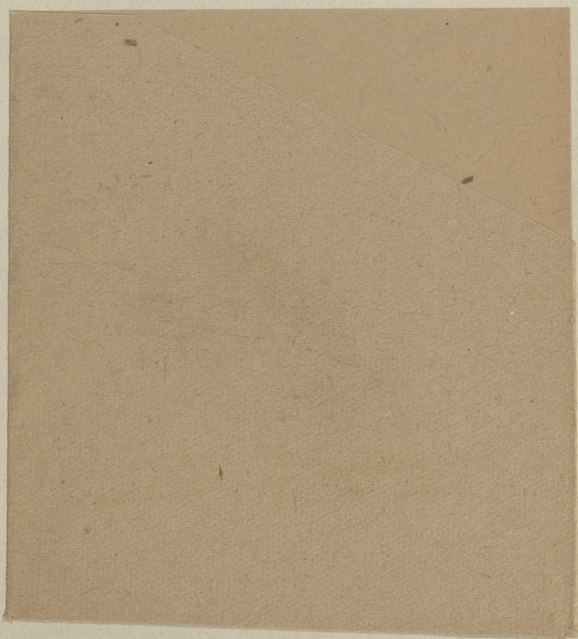
Технический редактор А. Т а м м

Корректор Х. Р о с с

Сдано в набор 25. VII 1958. Подписано к печати 6. X 1958.  
Бумага 54:84  $\frac{1}{16}$ . Печатных листов 1,25. По формату 60×92 пе-  
чатных листов 1,03. Учетно-издательских листов 0,82. Тираж 800.  
МВ-07435. Заказ № 1276.

Типография «Пунане Тяхт», Таллин, ул. Гийкк, 54/58.

Цена 60 коп.



60 коп.