

ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НА РАБОТУ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА, НАСТРОЕННОГО НА МОДУЛЬНЫЙ ОПТИМУМ

Розглядається проблема впливу обмеження ЕРС підсилювача потужності на роботу контуру регулювання струму, який настроєно на модульний оптимум. Наведено аналітичну залежність між співвідношенням сталих часу, що компенсуються і не компенсуються, і необхідним значенням ЕРС підсилювача потужності, при якому забезпечується робота контуру регулювання струму в лінійному режимі.

Рассматривается проблема влияния ограничения ЭДС усилителя мощности на работу контура регулирования тока, настроенного на модульный оптимум. Приведена аналитическая зависимость значения ЭДС усилителя мощности от соотношения значений компенсируемой и некомпенсируемой постоянных времени в контуре тока, при котором обеспечивается работа контура регулирования тока в линейном режиме.

The problem of contour's tuning regulation of current with registration of the limited value electromotive force on the power strengthener's exit is examined. Analytical dependences between the correlation of a compensated and uncompensated time constant and the necessary supply electromotive force on the power strengthener's exit are given. Working of the contour's tuning regulation of current in the linear mode is provided by this necessary supply.

При коррекции замкнутых систем регулирования тока широко используется настройка на модульный оптимум (МО). Как известно, цель настройки контура тока на МО состоит в компенсации влияния на процесс регулирования тока больших электромагнитных постоянных времени устройств, которые входят в состав контура тока [2,7]. Желаемым результатом такой компенсации является уменьшение длительности переходного процесса по току. При этом, как правило, забывают физический смысл компенсации влияния электромагнитных постоянных времени. А он состоит в форсировке переходного процесса в контуре регулирования тока за счёт подачи повышенного напряжения. Это напряжение может в несколько раз превышать установившееся значение, обеспечивающее протекание в цепи нагрузки заданного значения тока. Поэтому компенсация влияния больших электромагнитных постоянных времени на процесс регулирования тока возможна только при использовании усилителя мощности с достаточно большим значением ЭДС. В противном случае система регулирования тока будет работать в нелинейном режиме с ограничением

ЭДС на выходе усилителя мощности. При этом на цепь нагрузки с выхода усилителя мощности будет поступать постоянное максимальное значение ЭДС, которое не будет реагировать на сигнал обратной связи по току до тех пор, пока ток в цепи нагрузки не превысит заданное значение. Поэтому будет лишь частично компенсироваться влияние больших электромагнитных постоянных времени на процесс регулирования тока. Мера этой компенсации зависит от фактической кратности форсировки, которая, в свою очередь, определяется заданным значением тока, и будет проявляться относительной продолжительностью работы усилителя мощности в режиме ограничения ЭДС (относительно длительности переходного процесса по току). Чем больше будет скачок сигнала задания тока, тем дольше будет работать усилитель мощности в режиме ограничения ЭДС и тем сильнее будет проявляться влияние больших электромагнитных постоянных времени на процесс регулирования тока. В результате быстрое действие оптимизированного контура регулирования тока окажется меньше расчётного. Если контур регулирования тока, работающий в режиме ограничения ЭДС, является внутренним контуром многоконтурной системы подчинённого ре-

гулирования, то это может быть причиной уменьшения запаса устойчивости системы и увеличения её колебательности. Чтобы исключить такие явления, необходимо выбирать параметры настройки системы на МО и параметры усилителя мощности таким образом, чтобы обеспечить требуемый запас по ЭДС, при котором внутренний контур регулирования тока будет работать в линейном режиме при максимально-возможном скачке сигнала управления, поступающего на его вход. Тогда быстродействие внутреннего контура регулирования тока будет соответствовать расчётному значению при любом изменении сигнала управления.

В связи с этим представляет интерес исследовать зависимость требуемого запаса по ЭДС, который должен обеспечить усилитель мощности, от параметров системы, настраиваемой на МО.

На рис.1 показана структурная схема контура регулирования тока возбуждения генератора или двигателя, выполненная на базе дискретного усилителя мощности. Для уменьшения погрешности регулирования тока возбуждения I_B и компенсации влияния большой постоянной времени $T_{ОВ}$ используют пропорционально-интегральный регулятор тока возбуждения (ПИ-РТВ) с передаточной функцией (ПФ)

$$H_{РТВ}(p) = \frac{U_y(p)}{\Delta U_{ТВ}(p)} = k_{РТВ} + \frac{1}{T_{РТВ}p} = \frac{k_{РТВ} T_{РТВ} p + 1}{T_{РТВ} p},$$

где $k_{РТВ}$, $T_{РТВ}$ – параметры ПИ-РТВ; $\Delta U_{ТВ}$, U_y – напряжения, максимальные значения которых ограничены на уровне $\pm 10V$.

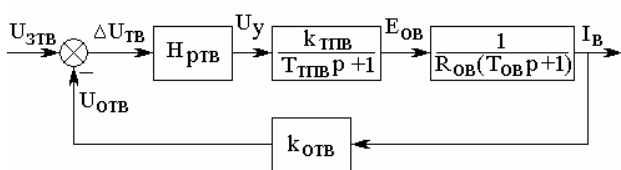


Рис.1. Структурная схема контура регулирования тока возбуждения

Кроме этого, на рис.1 приняты следующие обозначения: $U_{ЗТВ}$, $U_{ОТВ}$ – сигналы задания тока возбуждения и обратной связи по току возбуждения; $E_{ОВ}$ – электродвижущая сила на выходе дискретного усилителя мощности; $k_{ПТВ}$, $T_{ПТВ}$ – статический коэффициент

усиления и постоянная времени, учитывающая дискретные свойства усилителя мощности; $R_{ОВ}$, $T_{ОВ}$ – активное сопротивление и электромагнитная постоянная времени системы дискретный усилитель мощности - обмотка возбуждения (ОВ); $k_{ОТВ}$ – коэффициент обратной связи по току возбуждения.

В качестве дискретного усилителя мощности обычно используют управляемый тиристорный выпрямитель или транзисторный широтно-импульсный преобразователь. В первом случае частота коммутации ЭДС на выходе усилителя мощности $f_k = (100 \div 300)$ Гц во втором – $f_k = (1,0 \div 10)$ кГц. Поскольку в большинстве случаев полоса пропускания контура регулирования тока на порядок меньше f_k , то дискретный усилитель мощности на структурной схеме представлен непрерывным апериодическим звеном 1-го порядка. Известно, что в большинстве случаев дискретные свойства усилителя мощности невозможно компенсировать средствами системы управления, поэтому постоянную времени T_μ , учитывающую дискретные свойства усилителя мощности, считают некомпенсируемой и определяют по формуле

$$T_\mu = T_{ПТВ} = \frac{1}{f_k}.$$

Поскольку внутренними активным сопротивлением и индуктивностью дискретного усилителя мощности, как правило, можно пренебречь по сравнению с аналогичными параметрами ОВ, то электромагнитная постоянная времени $T_{ОВ}$ практически определяется только параметрами ОВ. Известно, что у двигателей и генераторов $T_{ОВ}$, как правило, имеет значение от 0,1 с до нескольких секунд, т.е. как минимум в 10 раз превышает значение T_μ . Для повышения быстродействия контура регулирования тока возбуждения необходимо компенсировать влияние электромагнитной постоянной времени $T_{ОВ}$, используя форсирующие свойства ПИ-РТВ, параметры которого выбирают в соответствии с условием

$$\begin{aligned} k_{РТВ} T_{РТВ} p + 1 &= T_{ОВ} p + 1, \\ k_{РТВ} T_{РТВ} &= T_{ОВ}. \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда быстродействие контура регулирования тока определяется постоянной времени $T_\mu = T_{ПТВ}$. Необходимо отметить, что компен-

сация влияния электромагнитной постоянной времени $T_{ОВ}$ на процесс регулирования тока при выполнении условия (1) будет иметь место только при работе контура регулирования тока в линейном режиме.

Поскольку рассматриваемый контур регулирования тока возбуждения имеет астатизм 1-го порядка по управлению, а при выполнении условия (1) его ПФ имеет характеристический полином 2-го порядка, то можно использовать настройку на модульный (технический) оптимум (МО). Для этого параметры ПИ-РТВ необходимо определить по формулам

$$T_{РТВ} = 2 \frac{T_{\mu} k_{ТПВ} k_{ОТВ}}{R_{ОВ}}, \quad (2)$$

$$k_{РТВ} = \frac{T_{ОВ}}{T_{РТВ}}. \quad (3)$$

Передаточная функция оптимизированного замкнутого контура регулирования тока, настроенного на МО,

$$H_{КТВ}(p) = \frac{I_{В}(p)}{U_{ЗТВ}(p)} = \frac{1}{k_{ОТВ} (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1)}. \quad (4)$$

В качестве примера рассмотрим синтез системы регулирования тока возбуждения двигателя постоянного тока ПН-290. Максимальное значение ЭДС дискретного усилителя мощности $E_{ОВ\text{ MAX}}=300$ В, а частота коммутации $f_k=10$ кГц. Номинальное значение тока возбуждения $I_{ВН}=2,5$ А, активное сопротивление ОВ при максимальной температуре двигателя $R_{ОВ}=89$ Ом, $T_{ОВ}=0,35$ с, $k_{ТПВ}=30$, $T_{ТПВ}=0,1 \times 10^{-3}$ с, $k_{ОТВ}=4$ В/А. В соответствии с формулами (2) и (3)

$$T_{РТВ} = 0,270 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \quad k_{РТВ} = \frac{0,35}{0,270 \cdot 10^{-3}} = 1298.$$

Аналогично рассчитаны параметры ПИ-РТВ для нескольких дискретных усилителей мощности, работающих с частотой 1,0 кГц, 100 Гц и 10 Гц. В среде Matlab было проведено моделирование системы в соответствии со структурной схемой рис.1. На рис.2 приведены графики переходных процессов по ЭДС $E_{ОВ}$ и току возбуждения $I_{В}$ при значениях T_{μ} , равных соответственно $0,1 \times 10^{-3}$ с (график 1), $1,0 \times 10^{-3}$ с (график 2), 10×10^{-3} с (график 3), 100×10^{-3} с (график 4) при обработке скачка сигнала задания тока $U_{ЗТВ}=1,0$ В.

Из этих графиков видно, что с уменьшением значения T_{μ} повышается быстродействие контура регулирования тока возбуждения, но при этом требуется большая форсировка по ЭДС $E_{ОВ}$. Сравнивая графики 1 и 2, можно сделать вывод о том, что не смотря на 10-кратное отличие значения T_{μ} из-за наличия ограничения ЭДС на выходе усилителя мощности, графики переходных процессов по току возбуждения практически совпадают. При этом длительность режима ограничения ЭДС $E_{ОВ}$ для графиков 1, 2 почти равна длительности переходного процесса по току возбуждения. Из графиков 3 и 4 видно, что при отсутствии ограничения значения ЭДС на выходе усилителя мощности 10-кратное отличие значения T_{μ} приводит к 10-кратному отличию длительности переходных процессов по току возбуждения.

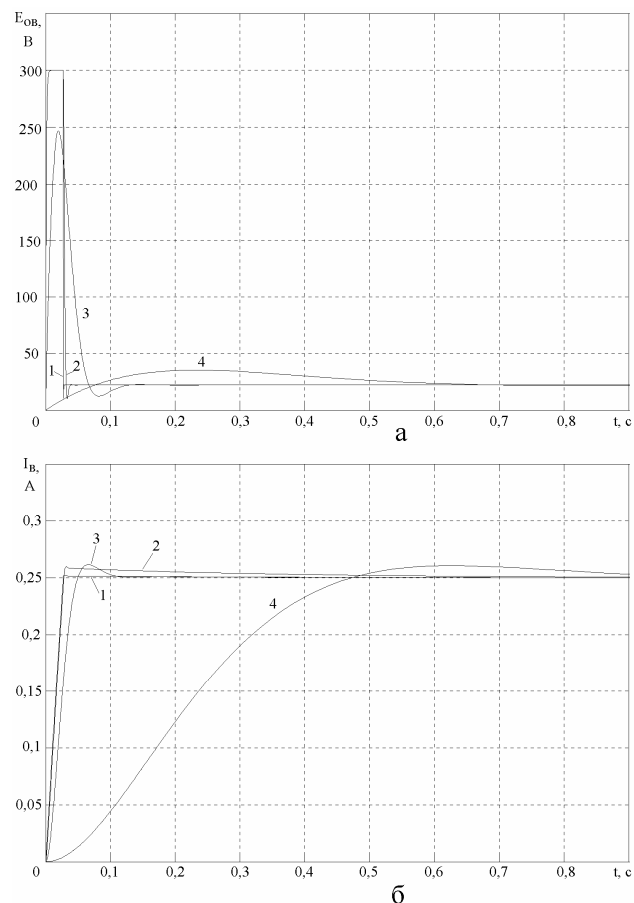


Рис.2. Переходные процессы по $E_{ОВ}(t)$ и $I_{В}(t)$ при $U_{ЗТВ}=1,0$ В

При скачке сигнала задания $U_{ЗТВ}=10$ В ограничение значения ЭДС $E_{ОВ}$ на уровне 300 В приводит к незначительному отличию графиков 1, 2, 3, соответствующих переход-

ным процессам по току возбуждения (рис. 3). При этом видно, что длительность режима ограничения ЭДС $E_{ОВ}$ для графиков 1, 2, 3 почти равна длительности переходного процесса по току возбуждения, которая увеличилась по сравнению с предыдущим случаем почти в 15 раз. Таким образом, наличие режима ограничения ЭДС $E_{ОВ}$ на выходе усилителя мощности не позволяет обеспечить компенсацию влияния большой постоянной времени $T_{ОВ}$ на процесс регулирования тока.

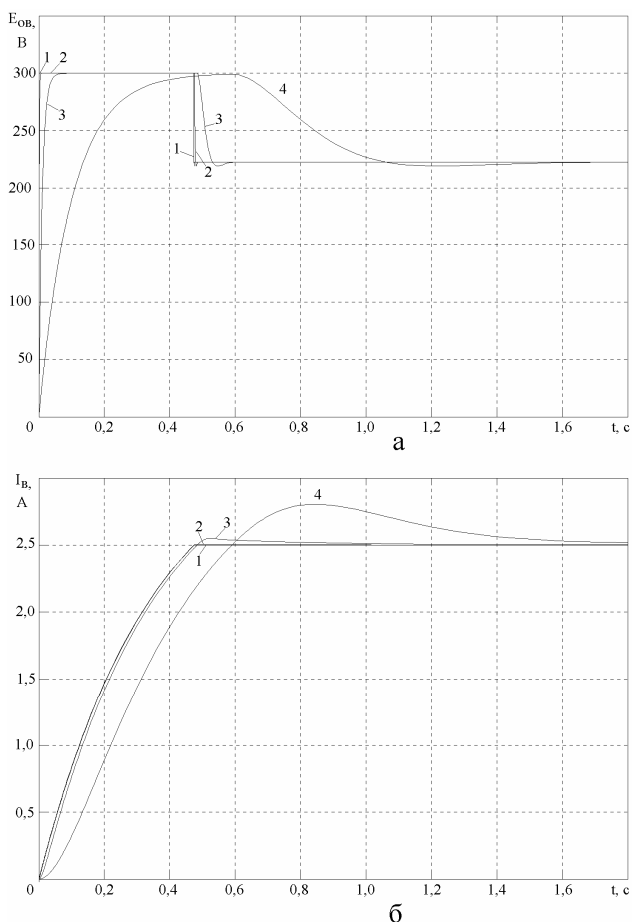


Рис.3. Переходные процессы по $E_{ОВ}(t)$ и $I_B(t)$ при $U_{ЗТВ}=10В$

Если бы мы ограничили максимальное значение $E_{ОВ}$ на уровне, соответствующем установившемуся режиму (форсировка равна единице), то практически совпали бы все четыре графика, приведенные на рис.2,б и рис.3,б. Таким образом, при работе усилителя мощности в режиме ограничения ЭДС уменьшается реальное быстродействие оптимизированного контура регулирования тока. В многоконтурной системе уменьшение быстродействия внутреннего контура приво-

дит к ухудшению качества работы всей системы.

Одним из способов улучшения динамических характеристик контура регулирования тока является исключение нелинейного режима его работы из-за недостаточного значения ЭДС усилителя мощности. С целью формирования требований к максимальному значению ЭДС усилителя мощности необходимо исследовать переходную функцию $E_{ОВ}(t)$ при работе оптимизированного контура регулирования тока в линейном режиме. Для этого, используя структурную схему рис.1, запишем ПФ, которая определяет связь между $E_{ОВ}$ и $U_{ЗТВ}$,

$$H_{КТВ}(p) = \frac{E_{ОВ}(p)}{U_{ЗТВ}(p)} = \frac{R_{ОВ}(T_{ОВ}p+1)}{k_{ОТВ}(2T_{\mu}^2p^2 + 2T_{\mu}p+1)}. \quad (5)$$

При скачке сигнала задания тока возбуждения изображение переходной характеристики по ЭДС усилителя мощности описывается выражением

$$E_{ОВ}(p) = \frac{R_{ОВ}(T_{ОВ}p+1)}{k_{ОТВ}(2T_{\mu}^2p^2 + 2T_{\mu}p+1)} \cdot \frac{U_{ЗТВ}(0)}{p}. \quad (6)$$

Используя теорему разложения и таблицы, приведенные в [1,3,4,5,6,8], перейдем от изображения (6) к оригиналу

$$E_{ОВ}(t) = U_{ЗТВ}(0) \cdot \frac{R_{ОВ}}{k_{ОТВ}} \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{k_T}{2T_{ОВ}}t} \times \left[\cos \frac{k_T t}{2T_{ОВ}} + (1 - k_T) \cdot \sin \frac{k_T t}{2T_{ОВ}} \right] \right\}, \quad (7)$$

где $U_{ЗТВ}(0)$ – скачок сигнала задания тока возбуждения; $k_T = T_{ОВ}/T_{\mu}$ – коэффициент соотношения компенсируемой и некомпенсируемой постоянной времени.

Определим момент времени, когда $E_{ОВ}(t)$ достигает максимального значения. Для этого необходимо приравнять нулю производную от (7):

$$\frac{dE_{ОВ}(t)}{dt} = U_{ЗТВ}(0) \cdot \frac{R_{ОВ}}{k_{ОТВ}} \cdot \left\{ 0 - e^{-\frac{k_T}{2T_{ОВ}}t} \cdot \left(-\frac{k_T}{2T_{ОВ}} \right) \times \left[\cos \frac{k_T t}{2T_{ОВ}} + (1 - k_T) \cdot \sin \frac{k_T t}{2T_{ОВ}} \right] - e^{-\frac{k_T}{2T_{ОВ}}t} \cdot \left(-\frac{k_T}{2T_{ОВ}} \right) \times \left[\sin \left(\frac{k_T t}{2T_{ОВ}} \right) - (1 - k_T) \cdot \cos \left(\frac{k_T t}{2T_{ОВ}} \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

Если момент времени, соответствующий первой экстремальной точке, обозначить

t_{MAX} , то в этой точке правая часть выражения (8) должна равняться нулю. В результате решения уравнения $dE_{OB}(t_{MAX})/dt=0$ получим

$$\sin\left(\frac{k_T t_{MAX}}{2T_{OB}} + \psi\right) = 0. \quad (9)$$

Если $k_T \leq 2$, то $0 \leq \psi \leq \pi/2$. Поэтому

$$\psi = \arctg\left(\frac{k_T}{2-k_T}\right). \quad (10)$$

Если $k_T > 2$, то $\pi/2 < \psi$. Поэтому

$$\psi = \pi + \arctg\left(\frac{k_T}{2-k_T}\right). \quad (11)$$

Из (9) следует

$$t_{MAX} = \frac{2T_{OB}}{k_T}(-\psi + k\pi), \quad (12)$$

где $k=0, 1, 2, \dots$

Чтобы значение t_{MAX} после подстановки в (12) правой части выражения (10) или (11) было положительным и минимальным, следует принимать $k=1$. Так, если $k_T \leq 2$, то

$$t_{MAX} = \frac{2T_{OB}}{k_T} \left(\pi - \arctg\left(\frac{k_T}{2-k_T}\right) \right). \quad (13)$$

Если $k_T > 2$, то

$$t_{MAX} = \frac{2T_{OB}}{k_T} \left(-\arctg\left(\frac{k_T}{2-k_T}\right) \right). \quad (14)$$

Подставляя (13) и (14) в (7), определим максимальное значение $E_{OB MAX} = E_{OB}(t_{MAX})$. После преобразований получим:

если $k_T \leq 2$, то

$$E_{OB MAX} = U_{ЗТВ}(0) \cdot \frac{R_{OB}}{k_{OTB}} \times \left\{ 1 + \frac{1}{2} \sqrt{(2-k_T)^2 + k_T^2} \cdot e^{-\left(\pi - \arctg\frac{k_T}{2-k_T}\right)} \right\}, \quad (15)$$

если $k_T > 2$, то

$$E_{OB MAX} = U_{ЗТВ}(0) \cdot \frac{R_{OB}}{k_{OTB}} \times \left\{ 1 + \frac{1}{2} \sqrt{(2-k_T)^2 + k_T^2} \cdot e^{\arctg\frac{k_T}{2-k_T}} \right\}. \quad (16)$$

Установившееся значение ЭДС E_{OBUCT} на выходе дискретного усилителя мощности определяется выражением

$$E_{OBUCT} = U_{ЗТВ}(0) \cdot \frac{R_{OB}}{k_{OTB}}. \quad (17)$$

Разделив (15) и (16) на (17), получим: если $k_T \leq 2$, то

$$\frac{E_{OB MAX}}{E_{OBUCT}} = 1 + \frac{1}{2} \sqrt{(2-k_T)^2 + k_T^2} \cdot e^{-\left(\pi - \arctg\frac{k_T}{2-k_T}\right)}, \quad (18)$$

если $k_T > 2$, то

$$\frac{E_{OB MAX}}{E_{OBUCT}} = 1 + \frac{1}{2} \sqrt{(2-k_T)^2 + k_T^2} \cdot e^{\arctg\frac{k_T}{2-k_T}}. \quad (19)$$

На основании (18) и (19) был рассчитан и построен график зависимости $E_{OB MAX}/E_{OBUCT} = f(k_T)$, который приведен на рис.4.

Из графика рис.4 следует, что для работы контура регулирования тока возбуждения в линейном режиме при $k_T = T_{OB}/T_{\mu} = 0,35/0,1 = 3,5$ максимальное значение ЭДС на выходе усилителя мощности должно в 1,59 раза превышать установившееся значение. Это же следует из графика 4, приведенного на рис.2,а. При этом перерегулирование по току возбуждения равно 4,3 %, что соответствует настройке контура тока на модульный оптимум. На рис. 3 значение E_{OB} ограничено на уровне 300 В (по расчёту $E_{OB MAX} = 354,5$ В). При этом перерегулирование по току возбуждения равно 12,2 %, что не соответствует настройке на модульный оптимум. Таким образом, при $U_{ЗТВ} = 10$ В недостаточно большое значение E_{OB} приводит к нарушению настройки контура тока на МО.

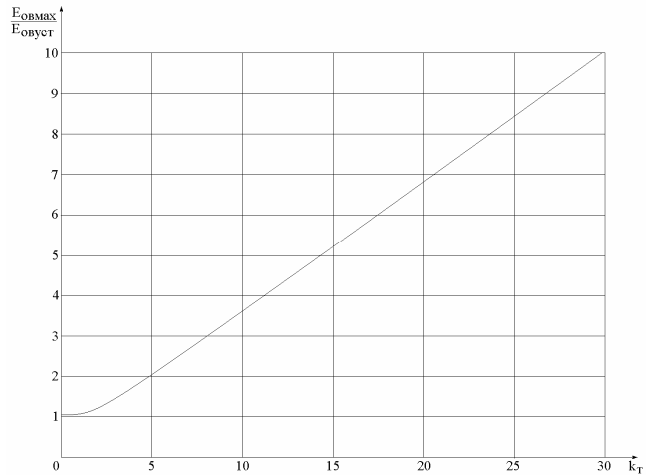


Рис.4. График зависимости относительного значения $E_{OB MAX}$ от коэффициента k_T

Аналогично, если $T_{\mu} = 0,01$ с, то $k_T = 35$ и из (19) следует, что для работы контура регулирования тока в линейном режиме максимальное значение ЭДС на выходе усилителя мощности должно в 11,1 раза превышать установившееся значение ЭДС. Действительно, на рис.2,а (график 3) мы видим, что при

$E_{\text{ОВУСТ}}=22,25$ В максимальное значение ЭДС $E_{\text{ОВМАХ}}=246,9$ В. При этом перерегулирование по току возбуждения составляет 4,64 %, что соответствует настройке контура регулирования тока возбуждения на модульный оптимум. На рис. 3,а (график 3) значение $E_{\text{ОВ}}$ ограничено на уровне 300 В, а для обеспечения линейного режима работы контура регулирования тока требуется $E_{\text{ОВМАХ}} = 2469$ В. При этом перерегулирование по току возбуждения равно 2,0 %, что также не соответствует настройке контура регулирования тока на модульный оптимум.

Таким образом, полученная аналитическая зависимость позволяет на основании соотношения компенсируемой и некомпенсируемой постоянной времени определить требуемое максимальное значение ЭДС на выходе усилителя мощности, при котором обеспечивается полная компенсация влияния большой постоянной времени при регулировании тока. При этом оптимизированный контур тока работает в линейном режиме, что позволяет обеспечить постоянство динамических характеристик контура регулирования тока при любом значении сигнала управления. А это упрощает настройку и повышает качество работы многоконтурной системы, в которой контур регулирования тока является внутренним.

Список использованной литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А Бессонов – М.: Высшая школа, 1973 – 791 с.
2. Герасимьяк Р.П. Повышение качества систем автоматического управления / Р.П. Герасимьяк Учеб. пособие.– К.: УМК ВО, 1992. – 100 с.
3. Дёч Г. Руководство по практическому применению преобразования Лапласа. /Пер. с нем./ Г.Дёч – М.: Физматлит, 1960 – 207 с.
4. Диткин В.А. Справочник по операционному исчислению. Основы теории и таблицы формул/ В.А. Диткин, П.И. Кузнецов. – М-Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1951. – 255 с.

5. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов / Н.С.Пискунов Учебник для ВТУЗов. – М.: Физматгиз, 1963. – 856 с.

6. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / [Бесекерский В.А., Герасимов А.Н., Порфирьев Л.Ф., Фабрикант Е.А., Федоров С.М., Цветков В.И.]; под ред. В.А. Бесекерского. – М.: Физматгиз, 1972. – 588 с.

7. Фрер Ф. Введение в электронную технику регулирования. /Пер. с нем./ Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. – М.: Энергия, 1973. – 192 с.

8. Шелковников Ф.А. Сборник упражнений по операционному исчислению. /Пер. с нем./ Ф.А. Шелковников, К.Г. Такайшвили. – М.: Высшая школа, 1976 – 184 с.

Получено 30.01.2011



Войтенко
Владимир Андреевич,
канд.техн.наук, доцент
каф. электромех. систем с
компьютерн. управл.
Одеск. нац. политехн. ун-та.
тел. 048-7348-467