

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ГАШЕНИЯ ПОЛЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Осадчук Ю.Г., к.т.н., доц., Козакевич И.А.
Криворожский технический университет
 г. Кривой Рог, ул. 22 Партсъезда, 11
 E-mail: aval@pop3.ru

У роботі здійснене порівняння ефективності існуючих способів гасіння поля синхронних машин. Показано ефективність гасіння поля при використанні статичного збудника, при переведенні тиристорів випрямляча в інверторний режим.

Ключові слова: гасіння поля, синхронний двигун, схема заміщення, випрямний пристрій.

In work comparison of efficiency of existing ways of clearing of a field of synchronous machines is carried out. Efficiency field clearing is shown at use of the static activator, while translating of thyristors the rectifier in inverse a mode.

Keywords: field clearing, the synchronous engine, an equivalent circuit, the device of rectifier.

Введение. Одной из важнейших функций системы возбуждения синхронного двигателя является автоматическое гашение поля. Оно осуществляется для уменьшения повреждений в синхронном двигателе при внутренних коротких замыканиях после отключения его от сети релейной защиты (устройствами гашения поля с этой целью должны снабжаться все синхронные двигатели мощностью свыше 500 кВт), а также для обеспечения самозапуска и ресинхронизации синхронного двигателя (в этом случае гашение поля предусматривается вне зависимости от мощности двигателя).

Цель работы - сравнение эффективности существующих способов гашения поля синхронных машин.

Материал и результаты исследования. Возбужденный СД после отключения от сети достаточно длительное время сохраняет значительную остаточную ЭДС. Периодическая составляющая тока в обмотке статора в случае восстановления питания при самозапуске СД в наиболее неблагоприятный момент, когда напряжение в электрической сети находится в противофазе с остаточной ЭДС, может быть оценена по следующему приближенному соотношению [1]:

$$I_{\text{вк}} = \frac{U + E_q''}{x_q'' + x_{\text{вн}}}, \quad (1)$$

где $x_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление электрической сети до источника ЭДС электрической системы. Если сверхпереходная ЭДС E_q'' велика, а сопротивление $x_{\text{вн}}$ мало, ток включения $I_{\text{вк}}$ может достигнуть двухкратного сверхпереходного тока трехфазного короткого замыкания на выводах СД, т.е. недопустимых значений по условиям электродинамических воздействий на двигатель. Автоматическое гашение поля при перерыве питания СД позволяет быстро снизить остаточную ЭДС и тем самым предотвра-

тить появление недопустимых значений токов статора в момент восстановления питания. Обычно оно осуществляется путем замыкания обмотки возбуждения на пусковое сопротивление, которое выполняет в этом случае функцию гасительного сопротивления. Если СД оснащен тиристорным возбуждающим устройством, возможно гашение поля переводом выпрямителя возбуждающего устройства в инверторный режим. Система возбуждения двигателя должна обеспечивать эффективное, т.е. быстрое гашение поля. Однако, стремясь к уменьшению времени гашения поля, нельзя превышать допустимое значение на обмотке возбуждения двигателя, которое для электромашинного выпрямительного устройства определяется классом изоляции обмотки возбуждения двигателя, а для статического возбуждающего устройства – классом применяемых тиристоров и схемой их включения.

Гашение поля должно осуществляться также при нарушении электроснабжения секции шин, к которой подключен двигатель. Нарушение фиксируется обычно реле частоты с блокировками, которые предотвращают работу устройств гашения поля при общих понижениях частоты в энергетической системе и близких коротких замыканиях. Обычно эти устройства работают при условии, что частота напряжения секции после нарушения электроснабжения снизилась до 46 – 48,5 Гц, в то время, как на другой секции частота напряжения не ниже 49 Гц, а напряжение не ниже 70-80 % от номинального. Используются также устройства, которые одновременно реагируют на снижение частоты и изменение направления активной мощности.

Рассмотрим эквивалентные схемы замещения синхронного двигателя [1].

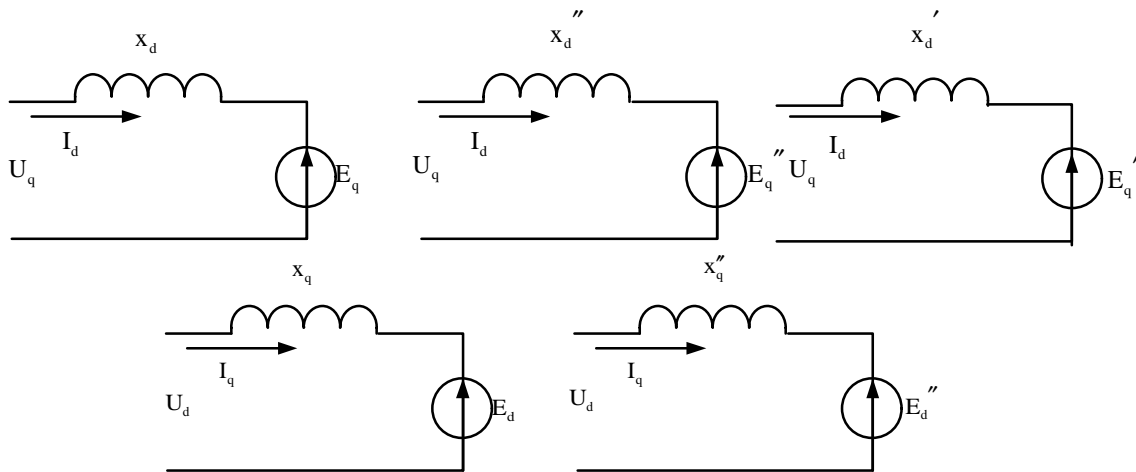


Рисунок 1 – Эквивалентные схемы замещения синхронного двигателя

После отключения СД от электрической сети ток статорной обмотки становится равным нулю ($I=0$) и из вышеприведенных схем замещения двигателя могут быть получены следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} U_q &= E_q'' = E_q' = E_q; \\ U_d &= E_d'' = E_d; \\ U &= \sqrt{(E_q'')^2 + (E_d'')^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Воспользуемся упрощенными уравнениями Парка - Горева для получения системы уравнений переходных процессов в СД для отключенного от электрической сети двигателя.

Упрощенные уравнения Парка - Горева имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= \left(\frac{d\psi}{dt} \right)_d - \psi_d \frac{d\gamma_{1\psi}}{dt} + R_{ст} I_d; \\ U_q &= \left(\frac{d\psi}{dt} \right)_q + \psi_d \frac{d\gamma_{1\psi}}{dt} + R_{ст} I_d, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\left(\frac{d\psi}{dt} \right)_d$ и $\left(\frac{d\psi}{dt} \right)_q$ – проекции вектора $\frac{d\psi}{dt}$ на оси d и q.

Дифференциальное уравнение переходных процессов в синхронном двигателе по продольной оси можно получить из операторной схемы замещения.

$$\begin{aligned} T_{d0}' T_{d0}'' \frac{d^2 E_q''}{dt^2} + (T_{d0}' + T_{d0}'') \frac{d E_q''}{dt} + E_q'' = K\omega \times \\ \times \left(U_f + T_{\sigma 1d} \frac{dU_f}{dt} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где K – коэффициент пропорциональности между напряжением на обмотке возбуждения U_f и синхронной ЭДС E_q . Если расчет производится в относительных единицах и за базисные единицы приняты номинальные напряжение U_{00N} и полная мощность S_N синхронного двигателя, то $K = \frac{x_{ad}}{R_f}$.

Эта система относительных единиц является основной для синхронного двигателя. Однако в нашем случае она неудобна для расчета напряжения на обмотке возбуждения U_f , поскольку мы имеем дело с синхронными машинами большой мощности, и базисное напряжение может достигать десятков киловольт, в то время как номинальное напряжение возбуждения – десятков (сотен) вольт. Вследствие этого напряжение на обмотке возбуждения в относительных единицах выражается значениями, порядок которых намного меньше порядка значений других величин, поэтому в нашем случае более удобной для расчета является система, базисной единицей в которой принято номинальное напряжение на обмотке возбуждения. Итак, все параметры синхронного двигателя, кроме напряжения возбуждения, будут определяться в основной системе относительных единиц, а напряжение возбуждения – в долях номинального напряжения на обмотке возбуждения. Поэтому коэффициент K найден из номинального режима синхронной машины:

$$E_{qN} = U_{fN} = K. \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение электромагнитных переходных процессов по поперечной оси на базе упрощенных уравнений Парка - Горева получаем из операторной схемы замещения:

$$T_{1q0} \frac{dE_d''}{dt} + E_d'' = 0. \quad (6)$$

Электромагнитный момент синхронного двигателя определяется из следующего соотношения:

$$M_j = \text{Re}[j\psi I]. \quad (7)$$

Поскольку мы рассматриваем режим отключенного от сети двигателя, то $I=0$ и $M_j=0$.

Таким образом, уравнение электромеханических переходных процессов можно представить в виде:

$$T_J \frac{d\delta}{dt} = M_{мех}, \quad (8)$$

где T_J – электромеханическая постоянная времени системы «двигатель – механизм»; δ – угол между поперечной осью ротора и синхронно вращающейся осью; $M_{мех}$ – момент сопротивления механизма.

Из уравнений (4), (6) и (8) составим систему, ко-

торая даст нам полное представление о процессах, происходящих в синхронном двигателе после отключения питания.

$$\left. \begin{aligned} T_J \frac{d\delta}{dt} &= M_{\text{мех}}; \\ T_{d0}' T_{d0}'' \frac{d^2 E_q''}{dt^2} + (T_{d0}' + T_{d0}'') \frac{dE_q'}{dt} + E_q &= \\ &= K\omega \left(U_f + T_{\sigma 1d} \frac{dU_f}{dt} \right); \\ T_{lq0} \frac{dE_d''}{dt} + E_d &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Учитывая (2), преобразуем систему таким образом, чтобы неизвестными переменными в ней были только сверхпереходные ЭДС. Получим:

$$\left. \begin{aligned} T_J \frac{ds}{dt} &= M_{\text{мех}}; \\ T_{d0}' T_{d0}'' \frac{d^2 E_q''}{dt^2} + (T_{d0}' + T_{d0}'') \frac{dE_q''}{dt} + E_q'' &= \\ &= \omega E_{qN} \times \\ &\times \left(U_f + T_{\sigma 1d} \frac{dU_f}{dt} \right); \\ T_{lq0} \frac{dE_d''}{dt} + E_d'' &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Начальные условия, соответствующие режиму отключения СД от электрической сети:

$$\left. \begin{aligned} s(0) &= s(-0) \\ E_q''(0) &= E_q''(-0); \\ \frac{dE_q''(0)}{dt} &= \frac{T_{d0}' + T_{d0}''}{T_{d0}' T_{d0}''} \frac{x_d' - x_d''}{x_d''} \times \\ &\times [U_q(-0) - E_q''(0)] + \\ &+ \omega E_{qN} \frac{T_{\sigma 1d}}{T_{d0}' T_{d0}''} \Delta U_f; \\ E_d''(0) &= E_d''(-0). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Как нетрудно заметить, полученная система уравнений переходных процессов в синхронном двигателе для отключенного от электрической сети двигателя состоит из трех практически независимых уравнений.

Из второго уравнения системы (10) следует, что на ЭДС E_q'' отключенного двигателя существенное влияние оказывает напряжение на обмотке возбуждения U_f , и, следовательно, соответствующим управлением режимом выпрямительного устройства двигателя можно добиться быстрого затухания этой ЭДС. Режим ускоренного затухания внутренней ЭДС синхронного двигателя называется гашением поля двигателя, и его обеспечение является одной из важнейших функций возбуждательного устройства. Поскольку гашение поля синхронного двигателя может осуществляться различными способами, це-

лесообразно определить эффективность каждого из них. Эффективность гашения поля оценивается по скорости затухания остаточной ЭДС двигателя либо по скорости спада тока в обмотке возбуждения. При этом напряжение на обмотке возбуждения не должно превышать допустимого значения.

Электромеханические переходные процессы в двигателе в режиме отключения его от электрической сети протекают только под воздействием тормозного момента механизма $M_{\text{мех}}$ независимо от электромагнитных переходных процессов. Электромагнитные переходные процессы по продольной и поперечной осям протекают независимо друг от друга, а относительно приведенных значений сверхпереходных ЭДС при условии $U_f = \text{const}$ – независимо и от электромеханических переходных процессов.

Исследования проводились для синхронного двигателя с массивным ротором СДТ-2500 со следующими параметрами:

$$\begin{aligned} P_N &= 2500 \text{ кВт}; \eta_N = 97.2\%; M_{\text{max}} = 1.71; M_{\Pi} = 1.71; \\ M_B &= 1.5; I_{\Pi} = 6.16; I_{fN} = 260 \text{ А}; U_{fN} = 76 \text{ В}. \end{aligned}$$

1. Исследовались процессы, происходящие в двигателе при отключении питания при условии сохранения напряжения возбуждения на прежнем уровне ($U_f = \text{const}$) – обмотка возбуждения получает питание от независимого источника. Численное решение системы уравнений (9) для двигателя СДТ-2500 представлено на рис. 2 – 7.

Нетрудно заметить, что сверхпереходная ЭДС в случае $U_f = \text{const}$ затухает медленно (более 20-ти секунд для наших условий моделирования), что может привести к аварии при повторном включении двигателя.

2. Рассматривался случай гашения поля путем закорачивания обмотки возбуждения двигателя $U_f = 0$, который применяется у двигателей, оснащенных бесщеточным возбуждательным устройством или статическим возбуждательным устройством.

Численное решение системы (10) для этого способа гашения поля представлено ниже.

Результаты математического моделирования позволяют сделать вывод, что повторное подключение синхронного двигателя на сеть можно производить спустя 20 секунд после его отключения, что не является удовлетворительным с точки зрения быстрого восстановления работоспособности после аварии.

3. Рассматривался случай гашения поля с помощью подключения к обмотке возбуждения активно-го сопротивления R_{Π} .

Напряжение на обмотке возбуждения двигателя (в относительных единицах) при гашении поля, осуществляемое замыканием этой обмотки на активное сопротивление R_{Π} , определяется по следующей формуле:

$$U_f = - \frac{x_{ad} K_{\Pi}}{E_{qN}} I_f, \quad (12)$$

где $K_{\Pi} = \frac{R_{\Pi}}{R_f}$ – кратность пускового сопротивления.

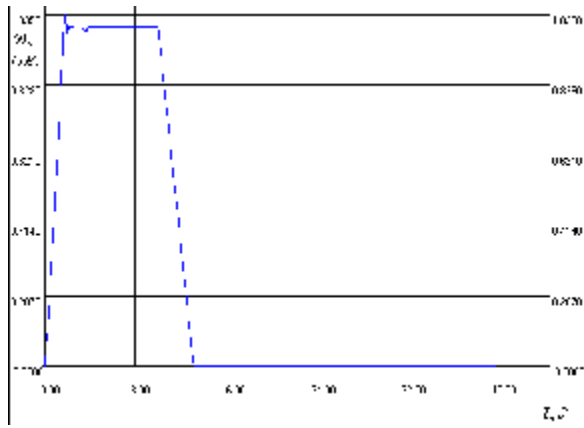


Рисунок 2 – Графік $\omega = f(t)$

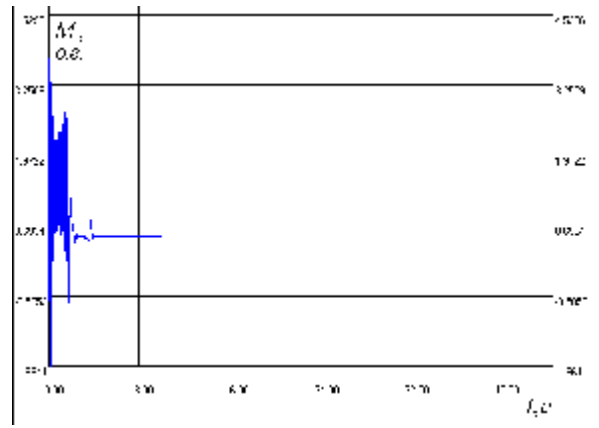


Рисунок 3 – Графік $M_э = f(t)$

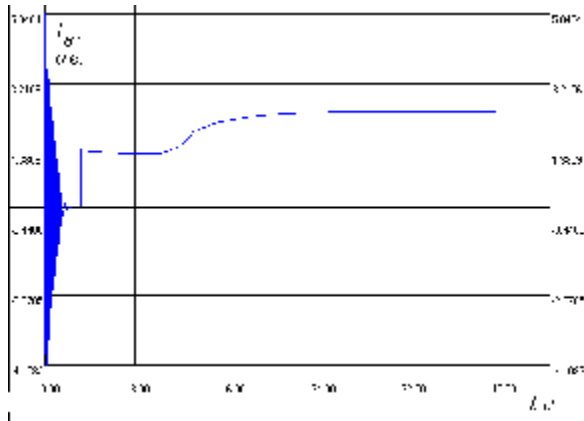


Рисунок 4 – Графік $i_в = f(t)$

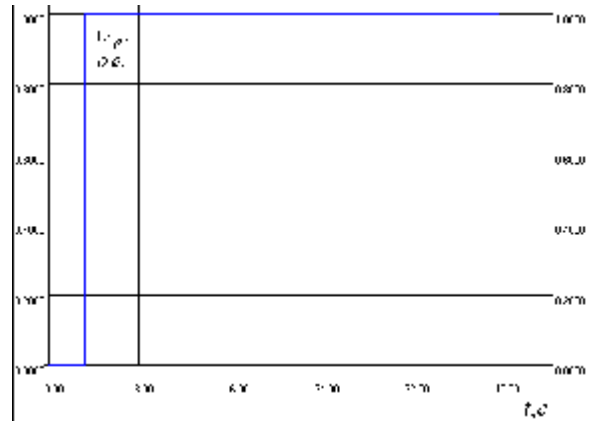


Рисунок 5 – Графік $U_в = f(t)$

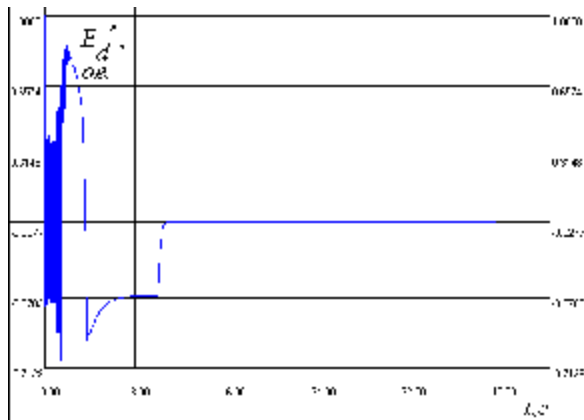


Рисунок 6 – Графік $E_d'' = f(t)$

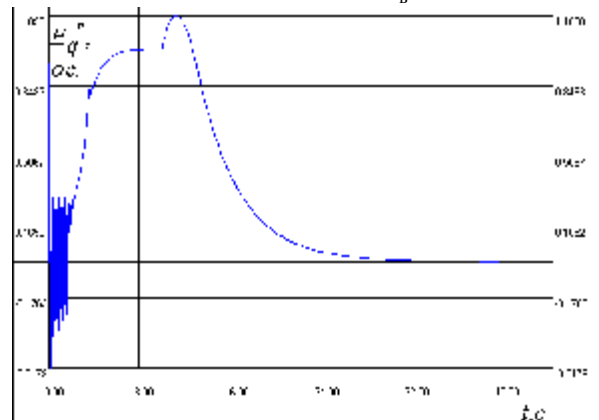


Рисунок 7 – Графік $E_q'' = f(t)$

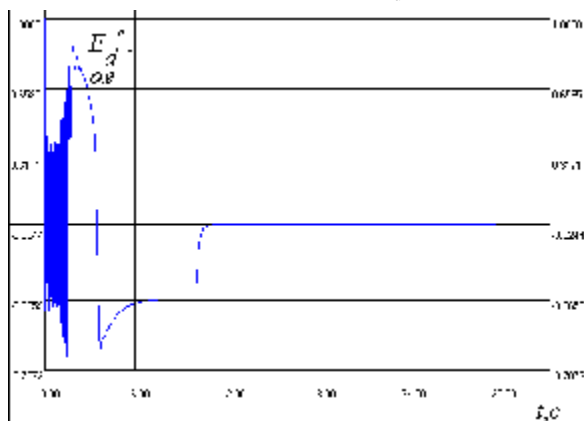


Рисунок 8 – Графік $E_d'' = f(t)$

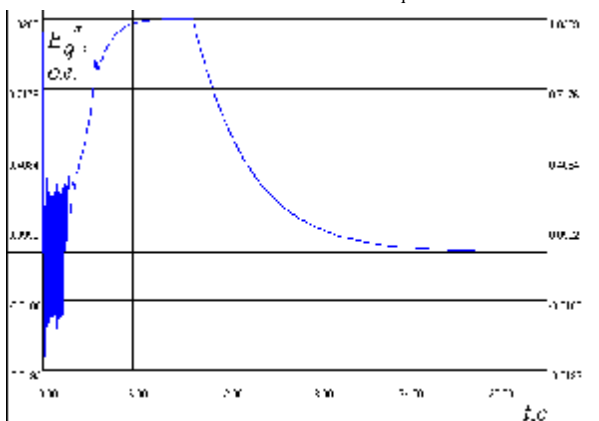


Рисунок 9 – Графік $E_q'' = f(t)$

Ток в обмотке возбуждения для произвольного режима СД выражается с помощью соотношения:

$$I_f = \frac{1}{T_{\sigma 1d} - T_{\sigma f}} \times \left[\frac{T_{\sigma 1d}}{x_{ad}} E_{qN} U_f - \frac{T_{\sigma 1d} T_{\sigma f}}{x_d''} E'_T - \frac{T_{\sigma f}}{x_{ad}} E_q \right] \quad (13)$$

Решая систему уравнений (11), (12) относительно напряжения на обмотке возбуждения в режиме гашения поля, получаем:

$$U_f = \frac{K_{\Pi} x_{ad}}{[(1 + K_{\Pi}) T_{\sigma 1d} - T_{\sigma f}] E_{qN}} \times \left[\frac{T_{\sigma f}}{x_{ad}} E_q + \frac{T_{\sigma 1d} T_{\sigma f}}{x_d'' - x_{\sigma}} E'_T \right] \quad (14)$$

Если пренебречь сопротивлением демпферной обмотки по продольной оси ($R_{1d}=0$), то напряжение на обмотке возбуждения двигателя в режиме гашения поля определяется более простым соотношением:

$$U_f = - \frac{E_q}{E_{qn}} K_{\Pi} \quad (15)$$

Численное решение системы (10) для этого способа гашения поля с кратностью пускового сопротивления $K_{\Pi} = 7$ приведено ниже.

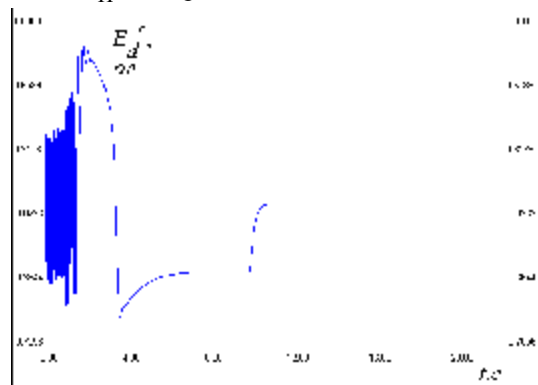


Рисунок 10 – График $E_d'' = f(t)$

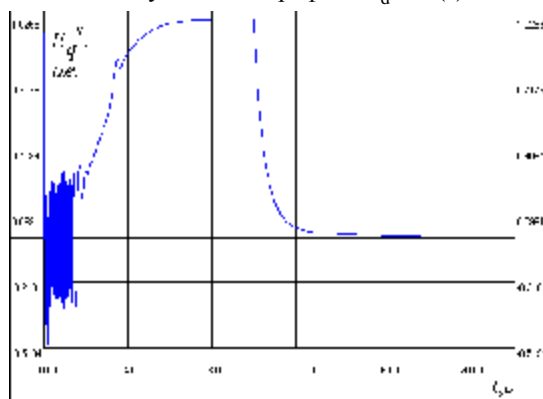


Рисунок 11 – График $E_q'' = f(t)$

Как видно из графиков, время гашения поля составляет примерно 6 секунд. Этот способ гашения поля эффективнее предыдущих и дает вполне удовлетворительные результаты, которыми можно ограничиться при отсутствии управляемого выпря-

мителя для питания обмотки возбуждения.

4. Анализировался случай гашения поля переводом выпрямительного устройства, питающего обмотку возбуждения двигателя, в инверторный режим:

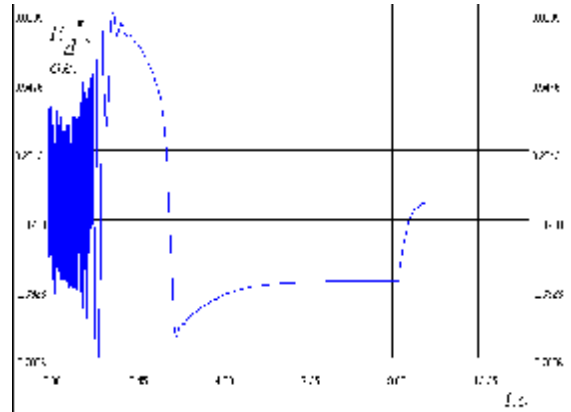


Рисунок 12 – График $E_d'' = f(t)$

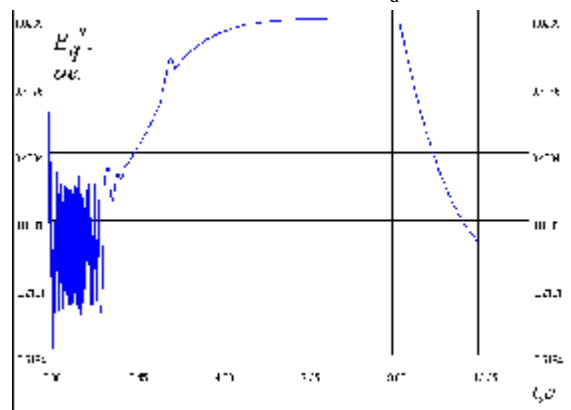


Рисунок 13 – График $E_q'' = f(t)$

В случае перевода выпрямительного устройства в инверторный режим поле двигателя будет погашено задолго до полного останова. Это является удовлетворительным результатом.

Выводы. Анализ переходных процессов в отключенном от электрической сети СД при различных способах гашения поля позволяет сделать следующие выводы о том, что наиболее эффективно гашение поля происходит у СД, оснащенного статическим ВУ, при переводе тиристорного выпрямителя в инверторный режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гамазин С.И., Понаровкин Д.Б., Цырук С.А. Переходные процессы в электродвигательной нагрузке систем промышленного электроснабжения. – М.: Издательство МЭИ, 1991.—352 с.
2. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980.

Стаття надійшла 11.04.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.