

УДК 62-831

М. А. ПРОХОРЧИК, аспирант, К. М. МЕДВЕДЕВ, кандидат технических наук, Г. О. ШИРОКОВ, ассистент, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, М. Л. ШИШАКОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАБОТУ ТИРИСТОРНОГО ПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассматривается влияние малых динамических изменений напряжения (МДИН) на тиристорный привод постоянного тока, работающий в режиме малых скоростей вращения электродвигателя или в режиме торможения противовключением.

Исследования показали, что МДИН сопровождаются резким изменением (прыжком) фазового угла питающего напряжения (ПФУ), которым пренебрегают стандарты.

Проведено моделирование переходного процесса в якорной цепи двигателя, обусловленного МДИН, при питании якоря от трехфазного управляемого тиристорного преобразователя, выполненного по мостовой схеме. Результаты позволили сделать вывод о том, что ПФУ может стать причиной значительного броска тока якоря (превышающего номинальный в несколько раз), приводящего к динамическому удару в двигателе и появлению кругового огня на коллекторе.

**Введение.** При эксплуатации систем электроснабжения (СЭС) в них происходят различные коммутации: подключение и отключение нагрузок, системные переключения, обусловленные выводом в ремонт либо вводом в эксплуатацию элементов системы, а также вызванные аварийными режимами. Все это приводит к динамическим изменениям напряжения в отдельных узлах системы вследствие изменения потоков мощностей и сопротивлений её элементов.

Согласно [1] *динамическое изменение напряжения электропитания* (ДИН) – это помеха, представляющая собой ступенчатое кратковременное изменение напряжения электропитания за регламентированный нижний или верхний предел, длительностью от полупериода частоты переменного тока до нескольких секунд с последующим возвращением к исходному значению.

С целью проведения исследований введём понятие *малого динамического изменения напряжения электропитания* (МДИН), под которым будем понимать ступенчатое кратковременное изменение напряжения электропитания, *не выходящее* за регламентированный нижний или верхний предел, длительностью от полупериода частоты переменного тока до нескольких секунд с последующим возвращением к исходному значению.

Таким образом, МДИН, в отличие от ДИН, является процессом, параметры которого не регламентируются нормативными документами, но влияние которого на работу электрооборудования не вызывает сомнений и потому подлежит изучению.

Поскольку элементы СЭС обладают не только активным, но и индуктивным сопротивлением, а также электрической емкостью, в процессе МДИН происходит изменение не только амплитуды напряжения, но и его фазы [2, 3]. По этой причине рассматриваемые МДИН можно охарактеризовать тремя основными параметрами: изменением ам-

плитуды напряжения, изменением фазы напряжения, длительностью процесса.

Длительность процесса обусловлена видом коммутации: при включении изменение напряжения в фазах происходит одновременно, при отключении – в момент перехода тока каждой фазы через ноль, что обусловлено горением дуги в коммутационном аппарате.

Изменение фазы напряжения будем называть *прыжком фазового угла* (ПФУ). Данный параметр не отражён в стандартах (в частности, в [1] и [5]), и потому его влияние на переходные процессы в электроустановках при возникновении МДИН отдельно не рассматривается, а значит, и не учитывается, что нельзя считать правильным подходом.

Весьма характерным примером электроустановки, подверженной крайне негативному влиянию МДИН, является тиристорный электропривод постоянного тока. Данный тип электропривода ещё широко используется в производстве, особенно там, где необходимо плавное регулирование скорости в широких пределах. Негативное влияние МДИН на его работу заключается в появлении броска тока якоря двигателя, значение которого может превысить номинальную величину в несколько раз, возникновении динамического удара в двигателе и кругового огня на коллекторе. Последствия МДИН в данном случае предсказать сложно.

**Теоретический анализ.** Неотъемлемой частью тиристорного привода постоянного тока является *тиристорный преобразователь* (ТП), в котором в качестве управляемых ключей используются тиристоры. Для открывания тиристора необходимо выполнение двух условий:

- потенциал анода должен превышать потенциал катода;
- на управляющий электрод необходимо подать открывающий (управляющий) импульс.

Момент появления положительного напряжения между анодом и катодом тиристора называется *моментом естественного открытия*. Подача открывающего импульса может быть задержана относительно момента естественного открытия на угол открытия. Вследствие этого задерживается начало прохождения тока через вступающий в работу тиристор и регулируется напряжение на выходе выпрямителя. Открытый тиристор может быть закрыт только после приложения к нему обратного напряжения.

На рисунке 1 тиристорный привод получает питание от СЭС с напряжением  $u_c(t)$ . Элементы системы электроснабжения (трансформаторы, линии электропередачи, реакторы) представим эквивалентными параметрами – сопротивлением  $R_C$  и индуктивностью  $L_C$ , а элементы внутризаводской и внутрицеховой СЭС (кабельные линии, трансформаторные подстанции, реакторы) – сопротивлением  $R_3$  и индуктивностью  $L_3$ . К системе производится подключение мощности  $S$ . Для простоты будем считать подключаемую мощность активной, и такой, чтобы после её включения действующее значение  $U_2$  напряжения  $u_2(t)$  не выходило за пределы, регламентированные [4].

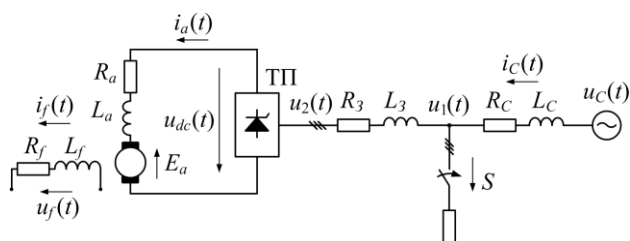


Рисунок 1 – Схема питания тиристорного привода постоянного тока и нагрузки от СЭС

На рисунке 2, *a* показана осциллограмма напряжений  $u_{2AB}(t)$ ,  $u_{2BC}(t)$  и  $u_{2CA}(t)$  при подключении мощности  $S$  к СЭС.

На рисунке 2, *б* обобщенный вектор  $\bar{U}_1$  трехфазного напряжения  $u_1(t)$  в точке подключения нагрузки отстает от обобщенного вектора  $\bar{U}_C$  трехфазного напряжения сети  $u_c(t)$  на угол  $\psi_1$ , что обусловлено падением напряжения на  $R_C$  и  $L_C$  от тока  $i_c(t)$ . После подключения нагрузки  $S$  падение напряжения в линии возрастает, и угол отставания  $\psi_1$  увеличивается до значения  $\psi'_1$ . Тогда разность  $\psi$  углов  $\psi'_1$  и  $\psi_1$  (до и после подключения нагрузки) и будет определять скачкообразное изменение аргумента вектора  $\bar{U}_1$  (а следовательно, и  $\bar{U}_2$ ), т. е. ПФУ:

$$\psi = \psi'_1 - \psi_1. \quad (1)$$

С большой долей вероятности можно утверждать, что любые ДИН или МДИН в сети сопровождаются изменением фазы, так как элементы системы обладают реактивными сопротивлениями

ми, кроме исключительно редких случаев, когда при коммутациях мощностей их реактивные составляющие не вызывают падения напряжения на реактивных сопротивлениях элементов сети.

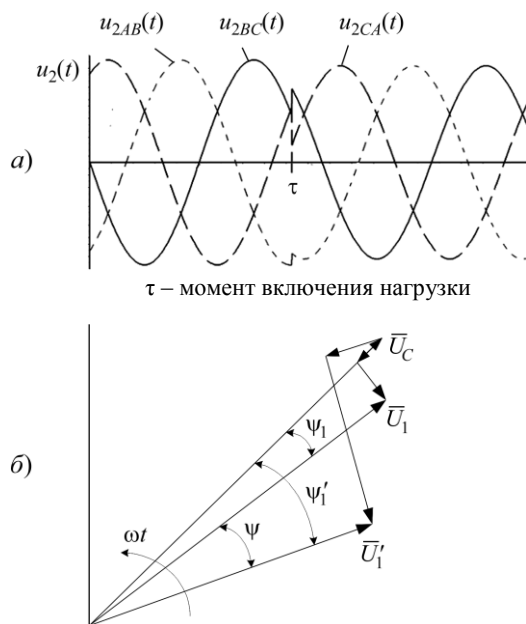


Рисунок 2 – Подключение нагрузки к СЭС, питающей тиристорный привод постоянного тока: *a*) осциллограмма трёх линейных напряжений  $u_2(t)$ ; *б*) векторная диаграмма, поясняющая изменение напряжений

С большой долей вероятности можно утверждать, что любые ДИН или МДИН в сети сопровождаются изменением фазы, так как элементы системы обладают реактивными сопротивлениями, кроме исключительно редких случаев, когда при коммутациях мощностей их реактивные составляющие не вызывают падения напряжения на реактивных сопротивлениях элементов сети.

Рассмотрим, используя рисунок 3, работу системы импульсно-фазового управления (СИФУ) ТП в составе привода постоянного тока до, в момент и после подключения нагрузки  $S$ .

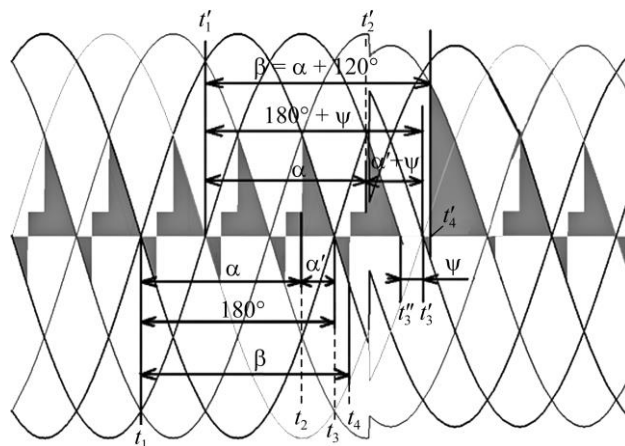


Рисунок 3 – Ошибка работы СИФУ при подключении нагрузки и появлении ПФУ

В качестве исследуемого привода выберем ЭПУ1Д, управляющий работой двигателя постоянного тока 2ПН160L. В приводах ЭПУ1 используется синхронный способ управления ТП, реализованный на основе многоканальной СИФУ с наиболее распространённым вертикальным способом отсчета угла управления.

До подключения нагрузки СИФУ работает следующим образом. Генератор опорного пилообразного напряжения (ГПН) синхронизируется с сетью линейным напряжением управляемого канала в момент  $t_1$  его перехода через ноль. Далее, когда значение напряжения с выхода ГПН соответствует заданному системой автоматического управления (САУ) углу  $\alpha$ , СИФУ вырабатывает импульс, который в момент времени  $t_2$  открывает тиристор, соответствующий рассматриваемому каналу управления. Затем через время, соответствующее электрическому углу  $\alpha' = 180 - \alpha$ , в момент  $t_3$  напряжение, приложенное к открытому тиристору, переходит через ноль, но из-за наличия в цепи якоря двигателя индуктивности тиристор закроется только в момент времени  $t_4$ , который соответствует углу записания  $\beta$ .

Если в момент времени  $\tau$  происходит подключение нагрузки  $S$ , то до этого момента СИФУ работает аналогично описанному выше. Покажем для этого случая работу другого канала СИФУ. ГПН синхронизируется с сетью в момент  $t'_1$ . Затем, когда в момент времени  $t'_2$  напряжение с выхода ГПН соответствует заданному САУ углу  $\alpha$ , СИФУ вырабатывает импульс, открывающий тиристор, соответствующий данному каналу управления. Однако через время, соответствующее углу  $\alpha' = 180^\circ - \alpha$ , в момент  $t''_3$ , напряжение, приложенное к открытому тиристору, не переходит через ноль (в отличие от времени  $t_3$ ), так как в момент времени  $\tau$  произошло подключение нагрузки. Данная коммутация вызвала незначительную просадку напряжения и прыжок аргумента обобщенного вектора  $\bar{U}_2$  назад на угол  $\psi$ . Поэтому переход напряжения через ноль произойдет позже на время, соответствующее электрическому углу  $\psi$ , в момент  $t'_3$ , а запираение – в момент  $t'_4$ .

Таким образом, из-за подключения нагрузки  $S$  полупериод питающего напряжения расширится на угол  $\psi$ , СИФУ никак не отреагирует на это, в результате чего произойдёт мгновенный прирост действующего значения  $U_{dc}$  выпрямленного напряжения  $u_{dc}(t)$ . То есть, ПФУ обобщенного вектора  $\bar{U}_2$  назад на угол  $\psi$  в процессе МДИН можно рассматривать как уменьшение угла открытия  $\alpha$  на величину прыжка  $\psi$ .

**Методика исследования.** Для теоретического исследования влияния МДИН на работу тиристор-

ного привода постоянного тока была разработана математическая модель, в основе которой лежат аналитические выражения для напряжения  $u_2(t)$ , выпрямленного напряжения  $u_{dc}(t)$  и тока якоря двигателя  $i_a(t)$ .

Пусть мощность сети несоизмеримо больше мощности привода, тогда сопротивлениями элементов СЭС можно пренебречь.

На рисунке 1 изображена схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения: цепь якоря с сопротивлением  $R_a + pL_a$  питается от трехфазного мостового ТП, цепь возбуждения с сопротивлением  $R_f + pL_f$  – от трехфазного мостового выпрямителя. Под действием трехфазного синусоидального напряжения  $u_2(t)$  и напряжения  $u_f(t)$  в цепи якоря и обмотке возбуждения протекают токи  $i_a(t)$  и  $i_f(t)$  соответственно (для простоты будем считать ток возбуждения  $i_f(t)$  константой  $i_f$ ). В обмотке якоря индуцируется ЭДС, пропорциональная току возбуждения  $i_f$  и скорости вращения двигателя  $\Omega$ :

$$E_a = \Omega \cdot i_f \cdot K, \quad (2)$$

где  $K$  – постоянная двигателя.

Переменное напряжение  $u_2(t)$ , питающее ТП, выражается в виде трехмерной матрицы синусоидальных функций  $u_{k,h,n}(t)$  размерностью  $2 \times 6 \times N$ , где строки соответствуют мгновениям коммутаций  $k$ , столбцы – фазам  $h$ , а сечения – периодам  $n$ :

$$u_{k,h,n}(t) = EU_k \sin\left(\omega t - 2\pi n - \frac{h\pi}{m} - \psi_k\right) \times [1(t - (k-1)\tau) - 1(t - k\tau)], \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая частота сети;

$E$  – амплитуда линейного напряжения;

$U_k$  – относительные значения напряжений до и после подключения нагрузки соответственно;

$\psi_k$  – углы сдвига фаз, обусловленные падением напряжения на индуктивном сопротивлении системы, до и после подключения нагрузки соответственно;

$\tau$  – момент времени подключения нагрузки;

$1(t)$  – единичная ступенчатая функция;

$N$  – число рассчитываемых периодов;

$m$  – количество фаз.

Выпрямленное напряжение  $u_{dc}(t)$  определим через поэлементное произведение матрицы  $u_{k,h,n}(t)$  на разность  $C_{k,h,n}(t)$  трехмерных матриц  $A_{k,h,n}(t)$  и  $B_{k,h,n}(t)$ , элементами которых являются единичные ступенчатые функции, задающие коммутации в тиристорах:

$$u_{dc}(t) = \sum_{k=1}^2 \sum_{h=1}^6 \sum_{n=1}^N [u_{k,h,n}(t) C_{k,h,n}(t)]; \quad (4)$$

$$C_{k,h,n}(t) = A_{k,h,n}(t) - B_{k,h,n}(t); \quad (5)$$

$$A_{k,h,n}(t) = 1 \left[ t - \frac{(h-1)\pi + \psi_k + 2\pi n + \alpha}{\omega} \right] \times \\ \times \left[ 1 \left( t - (k-1)\tau - \frac{2\pi}{3\omega} \right) - 1 \left( t - k\tau - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right]; \quad (6)$$

$$B_{k,h,n}(t) = 1 \left[ t - \frac{(h-1)\pi + \psi_k + 2\pi n + \beta}{\omega} \right] \times \\ \times \left[ 1 \left( t - (k-1)\tau - \frac{2\pi}{3\omega} \right) - 1 \left( t - k\tau - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right] + \\ + 1 \left[ t - \frac{(h-1)\pi + \psi_k + 2\pi n + \alpha + \frac{\pi}{m}}{\omega} \right] \times \\ \times \left[ 1 \left( t - k\tau \right) - 1 \left( t - k\tau - \frac{2\pi}{3\omega} \right) \right], \quad (7)$$

где  $\alpha, \beta$  – углы открытия и закрытия тиристорov соответственно.

Угол  $\beta$  в зоне непрерывного тока определяется по формуле

$$\beta = \alpha + \frac{\pi}{m}, \quad (8)$$

а в зоне прерывистого тока с углом отпирания больше критического – из трансцендентного уравнения (9), решаемого численно:

$$\left( \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sqrt{R_a^2 + L_a^2 \omega^2}} - \frac{\Omega K}{R_a R_f} \right) e^{\left( \frac{\chi(\beta - \alpha)}{\omega} \right)} = \\ = \frac{\sin(\beta - \varphi)}{\sqrt{R_a^2 + L_a^2 \omega^2}} - \frac{\Omega K}{R_a R_f}, \quad (9)$$

где

$$\chi = \frac{R_a}{L_a}; \quad (10)$$

$$\varphi = \arctg \left( \frac{\omega}{\chi} \right). \quad (11)$$

Критический угол открытия  $\alpha_{кр}$  определяется также из трансцендентного уравнения при

$$\beta = \alpha_{кр} + \frac{\pi}{m} :$$

$$\left( \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sqrt{R_a^2 + L_a^2 \omega^2}} - \frac{\Omega K}{R_a R_f} \right) e^{\left( \frac{\chi \pi}{\omega m} \right)} = \\ = \frac{\sin \left( \alpha_{кр} + \frac{\pi}{m} - \varphi \right)}{\sqrt{R_a^2 + L_a^2 \omega^2}} - \frac{\Omega K}{R_a R_f}. \quad (12)$$

Запишем уравнение для контура с током якоря двигателя по второму закону Кирхгофа:

$$u_{dc}(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + \Omega i_f K, \quad (13)$$

откуда

$$\frac{di_a(t)}{dt} = -\chi i_a(t) + \frac{u_{dc}(t) - \Omega i_f K}{L_a}. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) в аналитическом виде может быть записано следующим образом:

$$i_a(t) = -\frac{\Omega i_f K}{R_a} e^{-\chi t} + \\ + \int_0^t u_{dc}(t) e^{-\chi(t-\tau)} d\tau. \quad (15)$$

Кроме математической модели для расчета кривых  $u_2(t)$ ,  $u_{dc}(t)$  и  $i_a(t)$  была составлена имитационная модель тиристорного привода постоянного тока, показанного на рисунке 1, в среде программного комплекса *MatLab/Simulink*, позволяющая верифицировать вычисления, проведенные аналитическим способом.

**Результаты исследований.** Для выполнения вычислений по аналитическим выражениям (2) – (15) использовался пакет компьютерной математики *Maple*. Расчёт производился для двух режимов работы двигателя – двигательного и тормозного (торможение противовключением).

Результаты математического моделирования представлены на рисунке 4, из которого видно, что после подключения нагрузки  $S$  и возникновения МДИН происходит увеличение среднего значения выпрямленного напряжения  $u_{dc}(t)$ , что, в свою очередь, приводит к броску тока якоря  $i_a(t)$ , амплитуда и среднее значение которого увеличиваются практически в 5–6 раз.

Результаты имитационного моделирования, полученные в среде *MatLab/Simulink* и представленные на рисунке 5, соответствуют результатам математического моделирования, что даёт основание сделать вывод о достоверности разработанной математической модели.

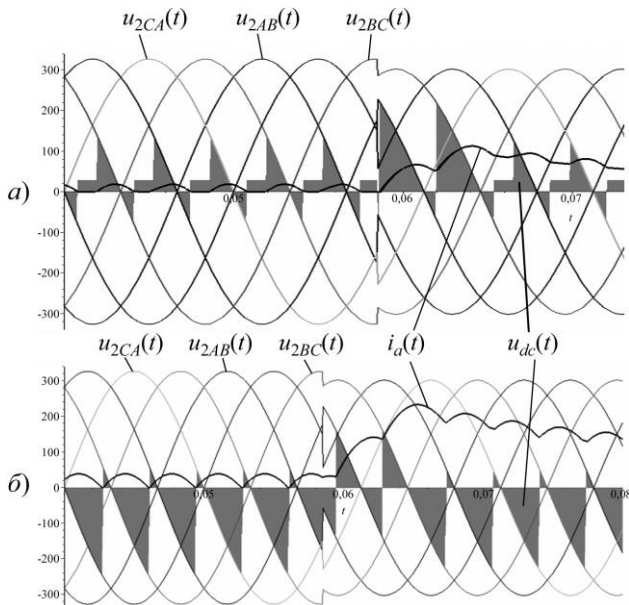


Рисунок 4 – Результаты математического моделирования:  
а – двигательный режим; б – тормозной режим

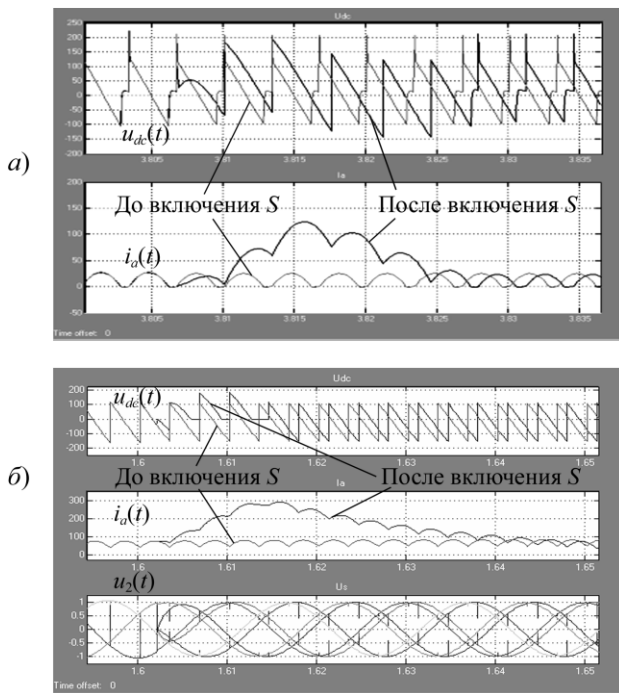


Рисунок 5 – Результаты моделирования в MalLab/Simulink:  
а – двигательный режим; б – тормозной режим

Получено 20.11.2009

**M. A. Prohorchik, K. M. Medvedev, G. O. Shirokov, M. L. Shishakov.** Influence of small dynamic changes of supply voltage on operating of thyristor converter-fed DC-motor drive.

In article is considered an influence of Small Dynamic Changes of supply Voltage (SDCV) on thyristor converter-fed DC-motor drive operating in low-speed mode or counter-current braking mode.

Research shown that SDCV is accompanied by a sharp changing of phase angle of supply voltage (Phase-Angle Jump – PAJ) which is neglected by standards.

It was conducted the modeling of SDCV-caused transient process in armature of DC-motor fed by three-phase thyristor bridge converter. The results allowed to draw a conclusion that PAJ can become a reason of significant current rush in armature (exceeding nominal current in several times) leading to a dynamic shock in motor and to appearance of a ring fire on collector.

Кроме того, на рисунке 5 после окончания переходного процесса становится хорошо видно смещение импульсов тока  $i_a(t)$  и напряжения  $u_{dc}(t)$  по отношению к соответствующим кривым до подключения нагрузки, что обусловлено ПФУ напряжения  $u_2(t)$ , сопровождающего возникшее МДИН.

**Выводы.** Выполненные исследования позволяют заключить следующее:

1 МДИН, возникающие в результате различных коммутаций в электрических сетях, сопровождаются ПФУ.

2 МДИН, так же, как и ДИН, могут оказывать заметное влияние на переходные процессы в СЭС.

3 ПФУ, сопровождающие МДИН, приводят к значительным броскам тока в якорной цепи двигателя постоянного тока, регулируемого ТП.

4 Влияние ПФУ не учитывают стандарты, регламентирующие уровень электромагнитной совместимости и методы испытаний тиристорных приводов постоянного тока.

#### Список литературы

1 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний: ГОСТ Р 51317.4.11-99. – Введ. 1999–12–28. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 21 с.

2 **Vilathgamuwa, D. M.** Interline Dynamic Voltage Restorer: A Novel and Economical Approach for Multiline Power Quality Compensation / D. M. Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon, S. S. Choi // IEEE Transactions on industry applications. – 2004. – No 6, vol. 40. – P. 1678–1685.

3 **Fitzer, C.** Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer / C. Fitzer, M. Barnes, P. Green // IEEE Transactions on industry applications. – 2004. – No 1, vol. 40. – P. 203–212.

4 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – Введ. 1999–01–01. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1997. – 30 с.

5 Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения. Требования и методы испытаний: ГОСТ Р 51524-99. – Введ. 1999–12–28. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 15 с.