

О РАСЧЁТЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ШИНАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРА С УЧЁТОМ УПРУГОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Исследованию электромеханических переходных процессов (ПП) посвящена рассматриваемая статья. Для исследования ПП используется квазидинамическая двухмассовая модель ПТГ с учетом существенно нелинейной упругости магнитного поля. Для данной модели разработана структурная схема. Параметры режимов получены при решении ПП на ЭВМ при помощи стандартного пакета MATLAB Simulink. Показано, что уменьшение времени срабатывания выключателей генератора или блочного трансформатора неоднозначно влияет на величины механических и электрических нагрузок.

Ключевые слова: электростанция, паротурбогенератор, математическое моделирование, колебательность, переходные процессы.

Расчет параметров в режиме трехфазного короткого замыкания (к. з.) на шинах турбогенератора (ТГ) или на блочном трансформаторе (БТ) весьма актуален по причинам огромных силовых и тепловых нагрузок на элементы паротурбогенератора (ПТГ) и БТ. Ввиду быстротечности данных переходных процессов (ПП), защита оборудования ПТГ и БТ осуществляется противоаварийной защитой (ПАЗ) — автоматикой. В эксплуатации наблюдаются случаи несрабатывания ПАЗ по причине: «Ничего абсолютно надежного нет». Тем более, что уровень безопасности ПАЗ ТГ из-за большого числа элементов и малой их надежности соответствует не более SIL 2 (ГОСТ Р МЭК 61508).

Эксплуатацию совершенно не устраивает чрезвычайно малая вероятность возникновения и развития аварийных событий. По негласному закону: «Стягивания опасных событий в одно место и в одно время»; последствия короткого замыкания могут быть вплоть до техногенных катастроф (спусковой крючок последовательности аварийных событий). Примеры – аварии на электростанциях: Чернобыльская, Саяно-Шушенская, Фукусимская и т. д.

Предлагается расчет параметров режима при трехфазном коротком замыкании определять на базе методики, изложенной в [4, 5] и основанной на допущениях

$$E_d' = \text{const}, U_0 = \text{const}.$$

где E_d' — ЭДС генератора за переходным сопротивлением X_d' ; U_0 — напряжение генератора к началу короткого замыкания.

В терминологии [3] это будет рассмотрение ПП в квазидинамической модели ТГ. Отличием рассматриваемой методики от традиционных (Веников, 1985, Важнов, 1960, Вольдек, 1974) является рассмотрение ПП с учетом упругости (жесткости) магнитного поля и введение в рассмотрение двухмассовой модели турбогенератора с учетом упругости (жесткости) магнитного поля C_M .

Под упругостью магнитного поля (ее тангенциальной составляющей) в электромеханической модели ТГ будем понимать упругость магнитно-силовых линий М. Фарадея.

Для выяснения основных вышеперечисленных параметров режима на первой стадии исследования рассмотрен неявнополюсный турбогенератор, затем можно сделать заключение о необходимости исследования ПП для явнополюсных генераторов.

Энергия для поддержания режима трехфазного к. з. поступает: от турбины и от части запасенной кинетической энергии вращающихся масс ПТГ. В энергетических процессах участвует также и потенциальная энергия жесткости валов ПТГ и магнитного поля ТГ. Эти взаимодействия делают ПП весьма сложным.

Ожидаются нелинейные колебания из-за нелинейности упругости магнитного поля C_M ТГ (будет показано ниже).

На первом этапе исследования рассмотрим упрощенную статическую электромеханическую двухмассовую модель ТГ, которая позволит изучить влияние упругости магнитного поля C_M на ПП при трехфазном к. з. на шинах ТГ. Искомые величины $M^\Gamma(t)$ и $\theta(t)$ могут быть получены при моделировании ПП в двухмассовой электромеханической модели (ЭММ) ТГ, которая представлена на рис. 1, где M_Σ^T — суммарный момент четырех цилиндров турбины; J_Σ — суммарный момент инерции четырех цилиндров и ротора ТГ; $M_{\Delta P}$ — эквивалентный момент постоянных потерь (ΔP_{FC} — в стали, ΔP_{MX} — механических, ΔP_B — возбуждение, ΔP_D — дополнительных);

$$M_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{FC} + \Delta P_{MX} + \Delta P_B + \Delta P_D}{\omega_0},$$

$\omega_0 = 314$ рад/с, скорость синхронная ТГ; ω_p — скорость ротора; M^Γ — расчетный момент турбины;

$$M^\Gamma = M_\Sigma^T - M_{\Delta P}$$

$M^\Gamma \approx -M_M^Y$ — статический момент генератора (упругий момент магнитного поля) может быть определен через статическую угловую характеристику и уравнение механики (произведение жесткости вала на угол поворота).

$$M_M^Y = C_M \theta = -M_m^\Gamma \frac{\sin \theta}{\theta} \theta = M_m^\Gamma \sin \theta,$$

$$C_M = M_m^\Gamma \frac{\sin \theta}{\theta},$$

M_m^Γ — максимальный момент ТГ в режиме трехфазного к. з.

Второй массой в ЭММ ТГ является эквивалентный момент инерции сети бесконечной мощности

$$J_c = \infty.$$

Под ним будем понимать механическое влияние такой сети, исходя из равенства эквивалентности электрической и механической энергий

$$W_C^\mathcal{E} = W_{\text{ЭММ}}^M.$$

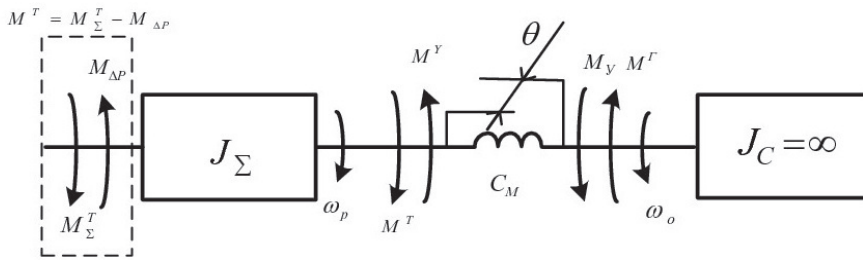


Рис. 1. Двухмассовая электромеханическая модель турбогенератора

Так как жесткость C_M и момент инерции ротора ТГ определяют частоту свободных колебаний подсистемы — ТГ, то можно прогнозировать влияние упругих моментов M^Y на механическую прочность валов ПТГ (Данилевич, 1997).

Можно также исследовать влияние длительности коротких замыканий (до отключения выключателя генератора и срабатывания стопорных клапанов) на параметры режима в ПП.

Наиболее точные решения по изменению параметров режима в ПП могут быть получены в квазидинамической электромеханической модели ТГ (Веников, 1985).

В (Веников, 1985, Важнов, 1960) показано, что при трехфазном коротком замыкании в обмотках возбуждения и успокоительной (в роторе ТГ) возникают аperiodические токи с постоянными времени $Td' = 0,5 \div 3,0$ и $Td'' = 0,02 \div 0,04$ соответственно. Период же собственных механических колебаний ротора мощных ТГ составляет $T_0 = 0,5 \div 2$ с. Учитывая данные соотношения введено допущение: $Td'' = 0$, аналогично и $Tq'' = 0$, а также считается $Td' = \infty$ и на основании постоянства потокосцепления Ψ приведены уравнения:

$$x_d' = x_{\sigma\alpha} + \frac{x_{\sigma f} + x_{\alpha d}}{x_{\sigma f} + x_{\alpha d}},$$

$$\underline{E}_d' = \underline{U} \cos \theta + x_d' I_d.$$

На основании которых получим выражение для угловой квазидинамической характеристики мощности $P^{\Gamma'}$ и момента $M^{\Gamma'}$ и жесткости магнитного поля C_M' в режиме трехфазного короткого замыкания:

$$\underline{P}^{\Gamma'} = \underline{M}^{\Gamma'} = \frac{\underline{E}_d' \underline{U}}{X_d'} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) \sin 2\theta,$$

$$\underline{C}_M' = \frac{\underline{M}^{\Gamma'}}{\theta} = \frac{\underline{E}_d' \underline{U}}{X_d'} \frac{\sin \theta}{\theta} + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) \frac{\sin 2\theta}{\theta},$$

и зависимости потенциальной энергии (тангенциальной составляющей) от угла нагрузки:

$$W_n' = \frac{1}{2} \left[\frac{\underline{E}_d' \underline{U}}{X_d'} \theta \sin \theta + \frac{U^2 \theta}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_d'} \right) \sin 2\theta \right].$$

Как видно из выражений для $\underline{M}^{\Gamma'}$, \underline{C}'_M и W'_n все параметры режима записаны в относительных единицах (подчеркивание параметров), где:

- X_d' — переходное сопротивление по оси d,
- $x_{\sigma\alpha}$ — сопротивление рассеяния обмотки якоря,
- $x_{\sigma f}$ — сопротивление рассеяния обмотки возбуждения,
- $x_{\alpha d} = x_{\alpha q}$ — собственные сопротивления обмотки якоря,
- \underline{E}_d' — ЭДС за переходным сопротивлением X_d' ,
- \underline{U} и \underline{I} — напряжение и ток,
- θ — угол нагрузки,
- φ — угол между векторами \underline{U} и \underline{I} ,
- I_d и I_q — проекция тока \underline{I} на оси d и q,
- ω_0 — скорость ТГ до 3-фазного к. з.).

На рис. 2 показаны векторная диаграмма и зависимости момента и потенциальной энергии от угла нагрузки для квазидинамической ЭММ.

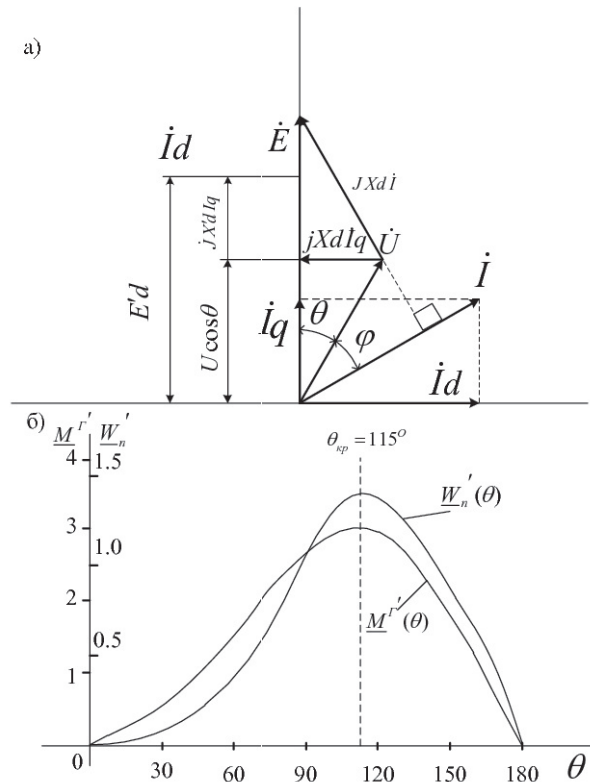


Рис. 2. Параметры режима при внезапном нарушении установившегося режима: а — векторная диаграмма напряжений синхронного генератора; б — угловая характеристика электромагнитного момента и потенциальной энергии поля в относительных величинах

Так как при трехфазном к. з. положили $Td'' = 0$, то демпфированием колебаний во время короткого замыкания пренебрегаем. Момент ТГ по данным (Вольдек, 1985) возрастает при трехфазном к. з. примерно в три раза (точнее надо считать для каждого ТГ по его паспортным данным). Соответственно возрастают $M_m^{\Gamma'}$, жесткость магнитного поля C_M' и частота свободных колебаний ω_0' и предельный угол нагрузки θ' .

Необходимо заметить, что величины $M^{\Gamma'}$, C_M' и W_n' зависят от параметров ТГ X_d' и X_d , которые в свою очередь будут определять ПП при трехфазном коротком замыкании. На рис. 3 показана структурная схема, позволяющая смоделировать математически все возможные трехфазные к. з. с отключением выключателя генератора (ВГ) за разное время $t_{кз}$, вплоть до срабатывания стопорных клапанов. Допуская, что трехфазное к. з. ликвидируется за выключателем генератора и далее начинается следующий ПП — холостой ход ПТГ с быстрым гашением поля возбуждения ТГ. Данный ПП будет рассмотрен на следующем этапе исследований.

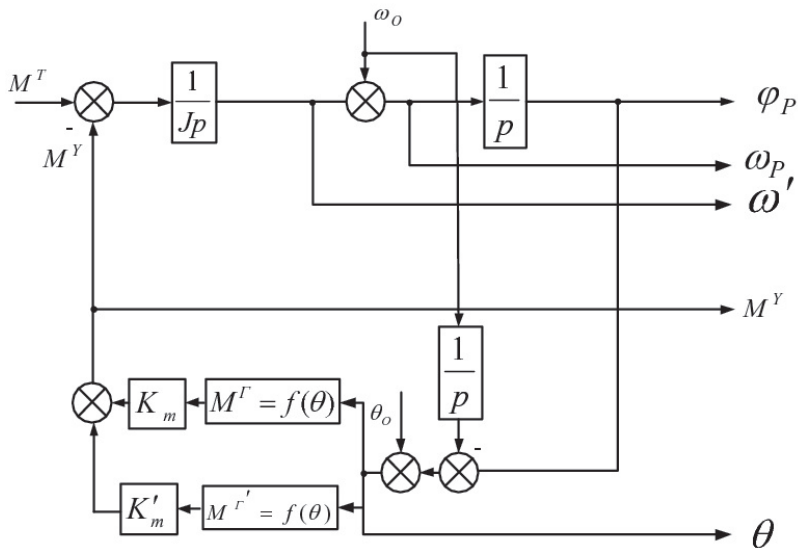


Рис. 3. Структурная схема электромеханической двухмассовой модели ТГ

В рассматриваемой структурной схеме время короткого замыкания задается длительностью действия коэффициента момента K_M' .

Искомые параметры режимов могут быть вычислены на ЭВМ при помощи стандартного пакета MATLAB Simulink (Герман-Галкин, 2008).

На рис. 4 показаны графики изменения $K_M'(t)$, моделирующие время $t_{кз}$. Естественно, что приблизительно через одну секунду после начала короткого замыкания сработают стопорные клапана и прекратят подачу пара к турбинам; т. е. через одну секунду надо положить $M^T = 0$ (а аварийные клапана котла сбросят избыточное давление пара в атмосферу).

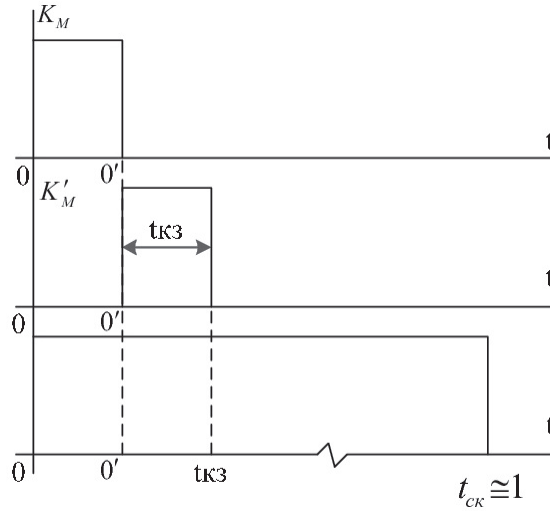


Рис. 4. Временные диаграммы при трехфазном коротком замыкании

При анализе зависимостей параметров режимов (рис. 5–7): $M^T = f(t)$ — момента турбины; $\omega_p = f(t)$ — скорости ротора; $M^\Gamma(t) = -M^Y(t)$ — момента генератора и упругого момента; $\theta(t)$ — угла нагрузки.

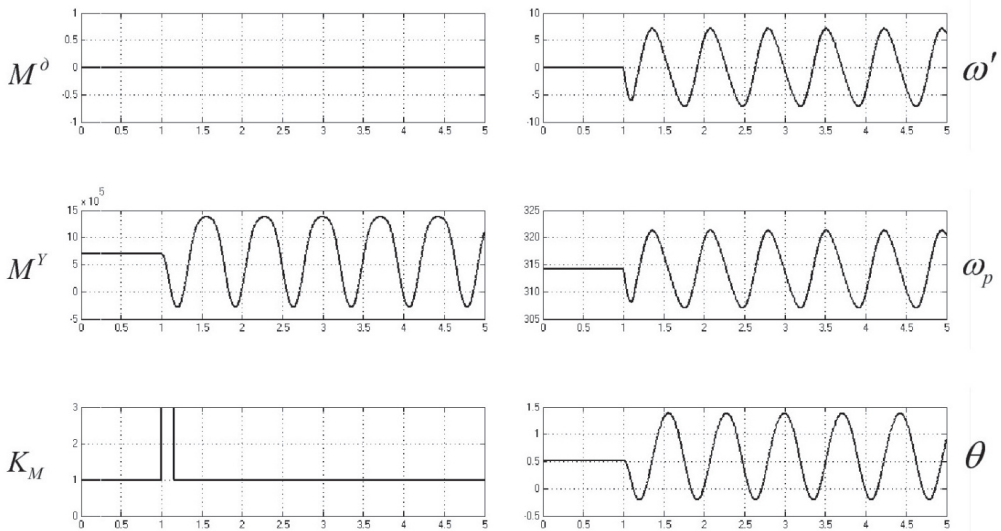


Рис. 5. Выходные сигналы модели при трехфазном к. з. в цепи ТГ без учета действия демпфирующей обмотки $M^T = M_H^\Gamma$, время действия к. з. — 150 мс

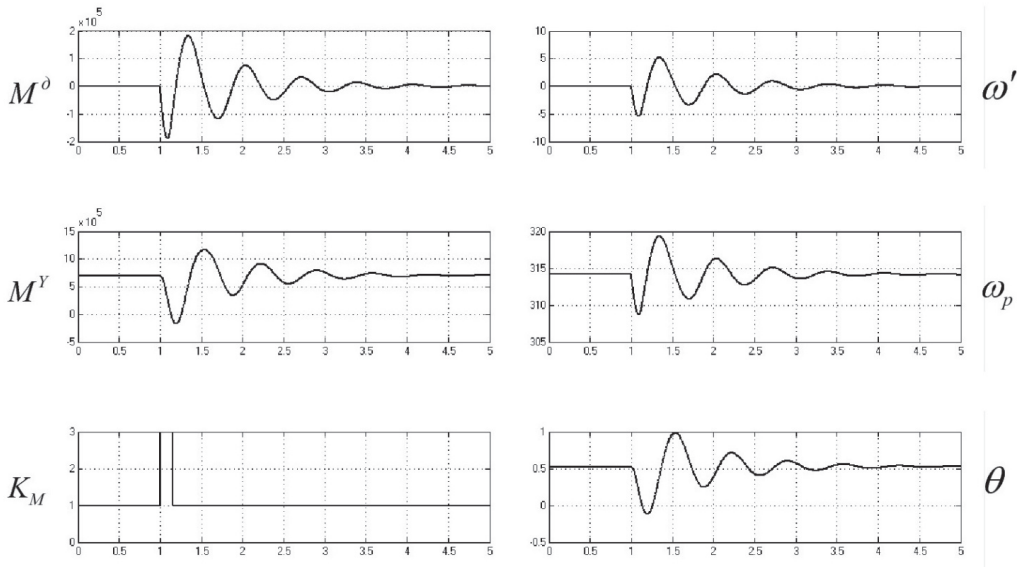


Рис. 6. Выходные сигналы модели при трехфазном к. з. в цепи ТГ с учетом действия демпфирующей обмотки $M^T = M_H^\Gamma$, время действия к. з. — 150 мс

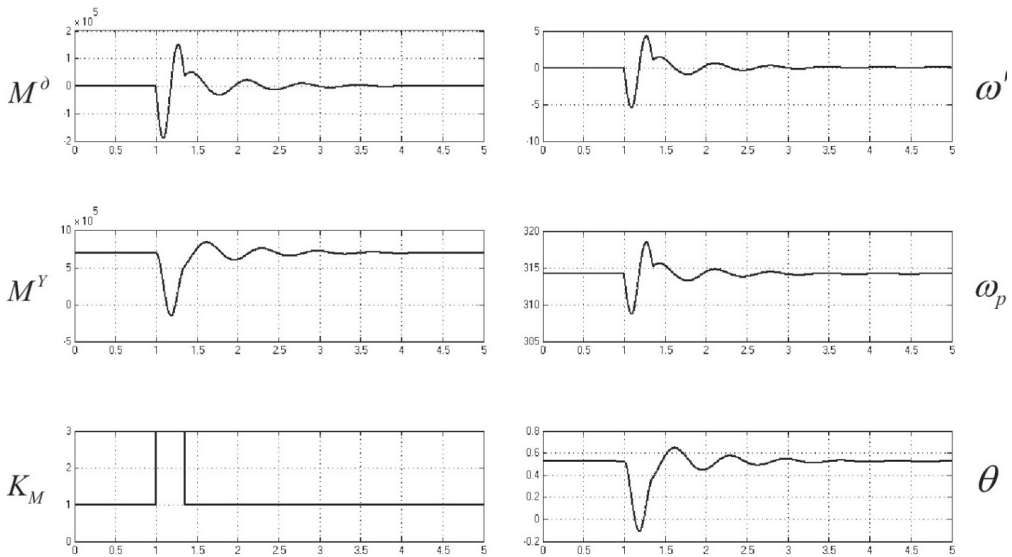


Рис. 7. Выходные сигналы модели при трехфазном к. з. в цепи ТГ с учетом действия демпфирующей обмотки $M^T = M_H^\Gamma$, время действия к. з. — 350 мс

При исследовании короткого трехфазного замыкания от номинального режима $M^T = M_H^\Gamma$, было отмечено следующее:

1. Все анализируемые зависимости имеют четкое физическое толкование и не содержат противоречий. В ПП при к. з. как и положено возникают колебания, связанные с обменом W_{Π}^{θ} и W_K^j .

2. Время короткого замыкания $t_{кз}$ существенно и неоднозначно влияет на параметры режимов вышеуказанных величин. Но оно будет определять величины размыкаемых ВГ токов короткого замыкания.

3. Угол сдвига между зависимостями приращения потенциальной энергии магнитного поля ΔW_{Π}^M и приращения кинетической энергии вращающихся масс ΔW_K^j равен 90° .

4. Критический динамический угол $\theta'_{кр}$ намного превышает статический критический угол $\theta_{кр}^{ст} = 90^{\circ}$.

На основании анализа зависимостей параметров переходного процесса были сделаны выводы:

1. Разработанная двухмассовая электромеханическая модель, ее структурная схема и методика исследования переходных процессов при трехфазном к. з. с учетом упругости магнитного поля адекватны реальным физическим процессам в турбогенераторе.

2. Во время действия короткого замыкания частота колебаний приближенно в два раза выше, чем после отключения к. з.

3. Необходимо также выполнить расчеты переходного процесса (трехфазное короткое замыкание на шинах ТГ) по методике Важнова А. И., в которой определяются зависимости асинхронных моментов от времени $M_{кз}(t)$, дополнить их расчетом зависимости угла нагрузки $\theta(t)$ и на основе этих зависимостей определить погрешности параметров режима, полученных непосредственно по выражению $M = f(t)$, и рассмотрены в данной статье.

Литература

1. ГОСТ Р МЭК 61508 «Функциональная безопасность систем энергетических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью».
2. Данилевич Я. Б., Карымов А. А. Оценка сокращения «срока жизни» вала ротора турбогенератора // Электричество. 1997. № 2.
3. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М. : Высшая школа, 1985. 536 с.
4. Важнов А. И. Основы теории переходных процессов синхронной машины, ГЭИ. 1960. 312 с.
5. Вольдек А. И. «Электрические машины». И. : Энергия, 1974. С. 839.
6. Герман-Галкин С. Г. Matlab&Simulink, Проектирование мехатронных систем на ПК, СПб. : Корона, 2008. С. 367.

ANALYSIS OF PARAMETERS A SHORT CIRCUIT ON TURBOGENERATOR'S TIRES IN VIEW OF RESILIENCE MAGNETIC FIELD

This paper is devoted to the investigation of electromechanical of TP. investigate used a quasi-two-mass TP model of PTH given an essentially nonlinear elasticity of the magnetic field. For the model developed by the block diagram. The parameters obtained by solving modes of PP on a computer using a standard package of MATLAB Simulink. It is shown that a decrease in response time switches the generator or transformer block is ambiguous effect on the magnitude of mechanical and electrical loads.

Keywords: power station, steam-turbogenerator, mathematical simulation, oscillate, transient processes.

Баласс Кирилл Алексеевич — ассистент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, +7 (8112) 75-22-46, kir.a.balass@gmail.com.

Егоров Владимир Егорович — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент, egorov_v_e@mail.ru.

Тращенко Сергей В. — инженер кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ.

Родионов Юрий Александрович — доцент кафедры «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ ВПО ПсковГУ, канд. техн. наук, доцент.

УДК 621.311.17

K. A. Balass, V. E. Egorov, S. V. Traschenkov, V. D. Smirnov

О БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ В XXI ВЕКЕ

Рассмотрены субъективные и объективные факторы, определяющие надежность и безопасность энергетики. Показано, что при проектировании и строительстве новых электростанций необходимо учитывать проектные и запроектные форс-мажорные обстоятельства и особенно их сочетание. При анализе технической безопасности сделан вывод, что существующая противоаварийная автоматика электростанций не в полной мере отвечает требованиям надежности и безопасности и отсутствует комплекс нормативной документации по безопасности.

Ключевые слова: электростанция, энергетика, атомная энергетика, национальная безопасность.

В предыдущих статьях (Егоров, 2008, Егоров, 2009, Егоров, 2010, Егоров, 2010) рассматривались отдельные аспекты состояния электроэнергетики в настоящее время.

При исследовании такого важного вопроса, как безопасность электростанции (ЭС), необходимо в основу анализа положить соответствие системы безопасности реальным условиям и тенденциям развития угроз для энергетики.