

УДК 621. 313.322

**АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И МНОГОКОНТУРНЫХ
ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ СЕРИИ ТГВ
МОЩНОСТЬЮ 200 МВт**

Ларин А.М., к.т.н., доц., Гведиди Фаузи Бен Килани, аспирант

Донецкий национальный технический университет

83000, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, каф. “Электрические системы”

E-mail: lam@elf.dgtu.donetsk.ua

Показано можливість використання сукупності електромагнітних параметрів турбогенераторів типу ТГВ-200 або ТГВ-200М, що виявлені різними методами, для дослідження динамічних режимів турбогенераторів потужністю 200 МВт серії ТГВ. Запропоновано методику універсального підходу до моделювання перехідних процесів при використанні еквівалентних схем заміщення різноманітної структури.

Ключові слова: турбогенератор, схема заміщення, моделювання, перехідний процес, метод.

The possibility to use aggregate of the type TGV-200 or TGV-200M turbogenerators electromagnetic parameters, which received by different methods, for research of the dynamic turbogenerators duties by power 200 MWt of series TGV is shown. The method of the common approach to transient processes modeling at the using of the complicated equivalent circuit of the different structures is offered.

Key words: turbogenerator, equivalent circuit, modeling, transient process, method.

Введение. Обеспечение высоких показателей надежности работы промышленных турбогенераторов (ТГ) обуславливает необходимость повышения точности анализа переходных режимов, возникающих в процессе их эксплуатации. При этом, в частности, нужен правильный учет изменения токов за короткий промежуток времени, соизмеримый со временем срабатывания выключателей, и оценка выделяемых при этом потерь в различных контурах электрической машины.

Для этого необходимо наличие как математических моделей, адекватно описывающих электромагнитное состояние синхронных машин (СМ), так и исходной информации в виде их параметров. Определение совокупности электромагнитных параметров, под которой понимаются индуктивные сопротивления, постоянные времени контуров, частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора и соответствующие им эквивалентные схемы замещения, - это одна из наиболее сложных проблем теории электрических машин.

Известно, что расчетные параметры современных крупных синхронных генераторов не могут в полной мере учесть влияние бесконечно большого числа контуров массива ротора, а также изменение параметров вследствие вытеснения токов в массиве бочки или демпферной системе. Наиболее точно их можно определить по экспериментальным частотным характеристикам (ЧХ).

В указанной связи требуется совершенствование существующих и разработка новых способов определения совокупности электромагнитных параметров турбогенераторов, а также оценка эффективности их использования для уточненного определения

электромагнитных параметров и математического моделирования.

Анализ предыдущих исследований. В настоящее время для уточнения моделей СМ используются экспериментальные методы, позволяющие учитывать сложные явления, протекающие в электрических машинах. Известен ряд способов [1-3] и подходов к экспериментальному определению совокупности электромагнитных параметров синхронных машин, отличающихся различными условиями магнитного состояния при проведении экспериментов, допущениями, положенными в основу обработки исходных данных, и степенью детализации получаемых эквивалентных схем замещения. Анализ экспериментальных частотных характеристик турбогенераторов, полученных различными методами в Украине и странах СНГ, и установленный характер закономерностей изменения эквивалентных активных и индуктивных сопротивлений контуров ротора [4, 5] указывает на возможность обобщения их электромагнитных свойств. При определении типовых параметров анализировались промышленные турбогенераторы различных мощностей и конструктивного исполнения. Поэтому их использование, в ряде случаев, может приводить к существенным погрешностям в расчете.

Более точные результаты можно получить, обобщая электромагнитные параметры и характеристики турбогенераторов, относящихся к одной серии исполнения, и полученные разными методами.

Цель работы. Оценка эффективности использования экспериментальных частотных характеристик, ТГ типа ТГВ-200 и ТГВ-200М, полученных различными методами, для исследования переходных про-

цессов, а также разработка методики универсального подхода к математическому моделированию динамических режимов при использовании сложных схем замещения различных структур.

Материалы и результаты исследований. Турбогенераторы типа ТГВ-200 имеют непосредственное охлаждение статора и ротора водородом. У ТГ типа ТГВ-200М охлаждение обмотки статора осуществляется водой. Модернизированным вариантом является ТГ типа ТГВ-2002М номинальной мощностью 210 МВт.

Конструкции роторов у таких генераторов абсолютно одинаковы. Обмотки возбуждения (ОВГ) выполнены из попарно сложенных проводников корытообразного сечения, между которыми образован канал для циркуляции охлаждающего газа.

Обмотка статора турбогенератора типа ТГВ-200М имеет одну, а ТГВ-200 – две параллельные ветви. Поэтому рассматриваемые ТГ имеют близкие (кроме индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора) значения электромагнитных параметров.

Методика проведения исследований:

- сопоставительный анализ частотных характеристик проводимостей со стороны обмотки статора генераторов ТГВ-200 и ТГВ-200М, полученных различными методами;
- сравнение результатов расчета средних асинхронных характеристик по исходным ЧХ с экспериментальными данными;
- разработка методики универсального подхода к моделированию переходных процессов во временной области при использовании сложных схем замещения различных структур;
- оценка достоверности исходных ЧХ путем сопоставления результатов расчета переходных процессов при асинхронном ходе генераторов с данными натурных испытаний.

На рис. 1 приведены частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора по продольной $y_d(js)$ и поперечной $y_q(js)$ осям ротора анализируемых генераторов.

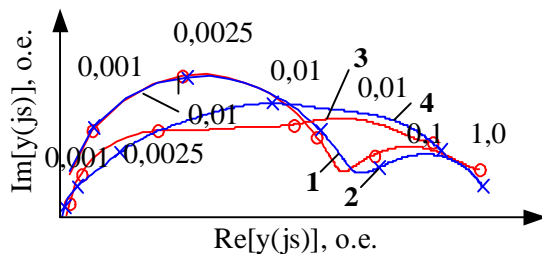


Рисунок 1 – Частотные характеристики турбогенераторов мощностью 200 МВт

Для ТГ типа ТГВ-200 (кривые 2 и 4) они определялись в ДонНТУ по данным опытов затухания постоянного тока в обмотке статора при заторможенном роторе [6]. Упомянутый метод включен в государственный стандарт на методы испытаний вра-

щающихся электрических машин переменного тока [7]. Начальный ток в опыте затухания составляет 10 А и соответствует очень малой линейной нагрузке статора. Поэтому для проведения опыта в соответствии с методикой, предусматривающей исключение частных циклов гистерезиса, определяемые совокупности электромагнитных параметров являются ненасыщенными.

Частотные характеристики для ТГ типа ТГВ-200М (кривые 1 и 3) рассчитывались по параметрам детализированных эквивалентных схем замещения с дискретными цепями, полученными экспериментально сотрудниками СибНИИ энергетики (г. Новосибирск, Россия) (рис. 2).

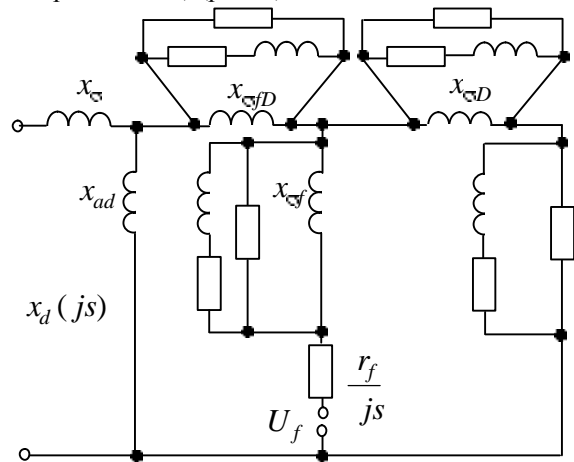


Рисунок 2 – Схема замещения турбогенератора ТГВ-200М по продольной оси ротора

Для учета насыщения параметры этих схем замещения сложной структуры корректировались по данным опытов внезапного короткого замыкания на выводах статора, а также по результатам испытаний в установившихся асинхронных режимах без возбуждения.

Характеристики по продольной оси симметрии ротора (рис. 1, кривые 1 и 2) соответствуют короткозамкнутому состоянию ОВГ.

Сравнение ЧХ по продольной оси, полученных для генераторов различными способами, свидетельствует об их практическом совпадении. Отличие амплитудных значений проводимостей в диапазоне частот тока в роторе от 0 до 2 о.е. не превышает 3,2%. В области скольжений ротора более 2 о.е., отличие модульных величин токов статора несколько увеличивается и достигает 8,5%. Несовпадение аргументов рассматриваемых ЧХ во всем диапазоне частот тока в роторе не превышает 1,8%. Сопоставление ЧХ по поперечной оси (рис. 1, кривые 3 и 4) указывает на их несовпадение в большей степени. Отличие по модулю в области скольжений от 0,002 до 0,1 о.е. достигает 24% и не превышает 6% в остальной области.

По частотным характеристикам были определены средние статические асинхронные характеристики – зависимости изменения тока статора и актив-

ной мощности от частоты тока в роторе турбогенератора. Характеристики рассчитывались для разомкнутого и замкнутого на пятикратное сопротивление самосинхронизации состояния ОВГ по следующему соотношению:

$$P_{ac}(s) = \frac{1}{\cos\phi} \cdot \frac{\text{Im}[y_d(j_s)] + \text{Im}[y_q(j_s)]}{2}, \quad (1)$$

$$I_{ac}(s) = \frac{\text{Mod}[y_d(j_s)] + \text{Mod}[y_q(j_s)]}{2}. \quad (2)$$

Результаты расчета сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными для турбогенератора типа ТГВ-200 [8]. На рис. 3 приведены средние асинхронные характеристики турбогенераторов мощностью 200 МВт для замкнутого на сопротивление самосинхронизации состояния ОВГ.

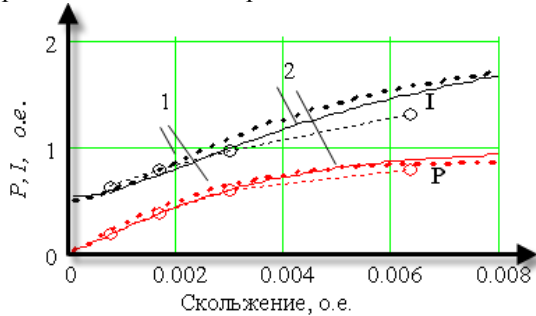


Рисунок 3- Асинхронные характеристики турбогенераторов мощностью 200 МВт

Как показывает анализ зависимостей $P(s)$, в области малых нагрузок генератора ($P < 0,6P_{ном}$) лучшее совпадение с опытными данными дает расчет по ЧХ ТГ ТГВ-200М (кривая 2). Погрешность в этой области не превышает 5%, а для ТГВ-200 (кривая 1) достигает 12,2%. При нагрузке $P = 0,6P_{ном}$ несовпадение характеристик увеличивается. При этом меньшее расхождение наблюдается для ТГВ-200 (несовпадение 6,9%) по сравнению с 11,2% для генератора ТГВ-200М.

Для зависимостей $I(s)$ лучшее совпадение наблюдается для ТГВ-200 (кривая 1) при нагрузках до $0,6P_{ном}$. При мощности генератора в установившемся АР без возбуждения более $0,6P_{ном}$ погрешность для ТГВ-200 увеличивается до 18,8%, а для ТГВ-200М, наоборот, снижается до 5,7%.

Анализ аналогичных зависимостей, полученных для разомкнутого состояния ОВГ, также указывает на неодинаковую погрешность результатов эксперимента и результатов расчета для различных значений скольжения ротора. При этом наибольшая погрешность для ТГВ-200 при нагрузке $0,6P_{ном}$ не превышает 11,7%.

Расчеты переходных процессов в турбогенераторах осуществлялись без учета влияния насыщения по полным уравнениям Парка-Горева. Эти уравнения позволяют описывать переходные процессы

машин переменного тока с учетом влияния неограниченного числа контуров на роторе.

Обычно используют уравнения, записанные в следующем виде:

$$\begin{cases} u_d = r_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \omega\Psi_d; & u_q = r_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega\Psi_q; \\ u_f = r_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt}; \\ 0 = r_{Dk} i_{Dk} + \frac{d\Psi_{Dk}}{dt}; & 0 = r_{Ql} i_{Ql} + \frac{d\Psi_{Ql}}{dt}; \\ k = 1..n_d; & l = 1..n_q. \end{cases} \quad (3)$$

Потокосцепления любой обмотки могут быть выражены на основе собственных и взаимных индуктивных сопротивлений следующим образом:

$$\Psi_i = \sum_{j=1}^j x_{ij} i_j, \quad (4)$$

где x_{ij} - взаимная индуктивность между i и j обмотками. Если $i=j$, то индуктивное сопротивление является собственным.

Очевидно, что для сложной схемы замещения, показанной на рис. 2, определение собственных и взаимных индуктивных сопротивлений, связывающих токи и потокосцепления, представляет достаточно сложную задачу. При этом на каждом шаге интегрирования уравнений (3) необходимо несколько раз решать систему линейных алгебраических уравнений (4) относительно токов. При расчете переходных процессов в операторной форме это приводит к сложным операторным выкладкам, не всегда дающим возможность при практических расчетах выполнить переход во временную область. Поэтому непосредственное использование для математического моделирования схем замещения сложных структур не эффективно. Для схемы замещения общепринятого типа в [9] предложен способ интегрирования уравнений вида (3), не требующий решения системы алгебраических уравнений. Используемые для определения токов проводимости при этом рассчитываются до начала процедуры интегрирования уравнений.

Для генератора ТГВ-200 синтез схем замещения общепринятой структуры лестничного типа, предполагающих одинаковую взаимную индуктивность между всеми контурами машины, осуществлялся непосредственно по параметрам экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих кривые затухания тока статора в опытах. При этом использовалось значение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, по данным заводского расчетного формуляра ($x_{\sigma} = 0,175$). Как было отмечено, при использовании схем замещения такой структуры процедура нахождения токов в контурах статора и ротора при интегрировании уравнений не вызывает трудностей. Однако при этом параметры, которые характеризуют обмотку возбуждения (ОВГ), являются эквивалентными и не всегда адекватно отражают ее влияние.

Для турбогенератора ТГВ-200М на основе частотных характеристик, рассчитанных по параметрам исходных схем замещения (рис. 2), в соответствии с разработанным в [10] способом, осуществлялся синтез схем замещения по осям d и q с вынесенной на зажимы источника ветвью намагничивания. Из условия адекватности исходных и расчетных частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора $y_d(j\omega)$ и комплексного коэффициента $C_f(j\omega)$ распределения тока статора в ветви ОВГ, последняя в схеме замещения представляется многоконтурной цепью (рис. 4).

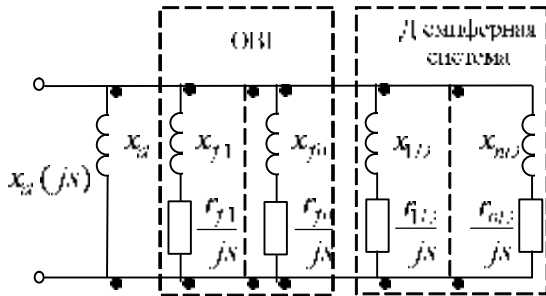


Рисунок 4 – Схема замещения ТГ при представлении ОВГ многоконтурной цепью

При этом использовалась справочная величина индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, численно равная значениям сверхпереходных индуктивных сопротивлений ТГ ТГВ-200М ($x_{\sigma} = x_d'' = x_q'' = 0,213$).

Достоверность полученных схем замещения оценивалась путем расчета электромагнитных переходных процессов при внезапном коротком замыкании на выводах ТГ из режима холостого хода и электрохимических, вызванных выпадением из синхронизма и переходом к установившемуся асинхронному режиму после потери возбуждения и последующего замыкания обмотки возбуждения на пятикратное сопротивление самосинхронизации. Изменения во времени токов в обмотках статора для ТГ типа ТГВ-200 и ТГВ-200М отличаются между собой практически в тех же пределах, в которых отличаются исходные частотные характеристики анализируемых генераторов. Погрешность во всем анализируемом временном диапазоне не превышает 9%. Анализ переходных токов в ОВГ свидетельствует об их существенном несовпадении (рис. 5).

Максимальное значение полного тока в ОВГ генератора типа ТГВ-200М (кривая 1) оказалось более, чем на 30% больше тока в ОВГ ТГ типа ТГВ-200 (кривая 2).

Это объясняется тем, что в полученных схемах замещения существенно отличаются токораспределения в обмотках исследуемых генераторов. Об этом свидетельствуют частотные характеристики $C_f(j\omega)$. Последние, рассчитанные в соответствии с

[10] для различных генераторов, приведены на рис. 6 (кривая 1 – ТГВ-200М, кривая 2 – ТГВ-200).

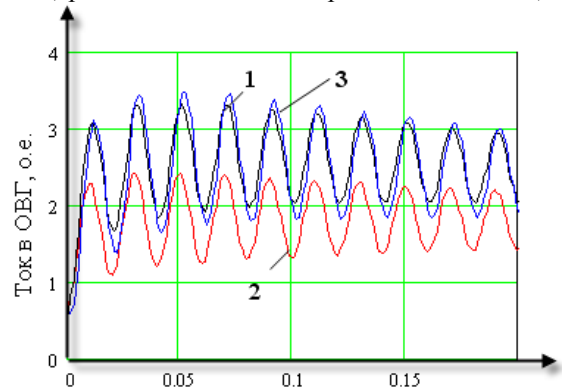


Рисунок 5 - Изменение тока в ОВГ при внезапном трехфазном КЗ на выводах генератора мощностью 200 МВт

На рис. 5 приведена зависимость изменения тока в обмотке возбуждения генератора типа ТГВ-200, полученная по схеме замещения, синтезируемой по исходной ЧХ с использованием характеристики $C_f(j\omega)$ для схемы замещения ТГ типа ТГВ-200М. Как следует из анализа, результаты расчета тока в ОВГ отличаются в этом случае не более, чем на 4%. Это указывает на необходимость при синтезе схем замещения по экспериментальным частотным характеристикам использовать исходную информацию в виде тока в обмотке возбуждения. Подобная задача решалась в [11].

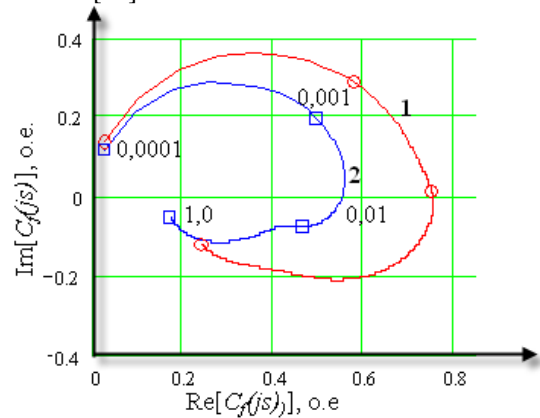


Рисунок 6 – Частотные характеристики комплексного коэффициента распределения тока статора в ОВГ

Исследование переходных процессов в установившихся асинхронных режимах турбогенераторов осуществлялось для простейшей расчетной системы: генератор – блочный трансформатор – эквивалентное сопротивление системы – шины неизменного напряжения. Индуктивное сопротивление системы определялось по параметрам режима в натурном эксперименте.

В таблице приведены результаты расчета переходных процессов, обусловленных замыканием ОВГ на пятикратное сопротивление самосинхронизации

исследуемых генераторов, работающих с активной нагрузкой, равной $0,4P_{ном}$, допустимой по условиям эксплуатации в течение 15 мин. Действие регуляторов скорости при этом не учитывалось. Там же приведены значения параметров асинхронного режима, зарегистрированные в опыте.

Таблица 1 – Параметры асинхронного режима ТГ мощностью 200 МВт

Параметр		Тип турбогенератора		Эксперимент
		ТГВ-200	ТГВ-200М	
P, МВт	P_{max}	96,0	83,6	95,7
	P_{min}	74,6	78,4	75,2
	P_{cp}	80,0	80,0	77,9
I, А	I_{max}	7,43	7,18	7,50
	I_{min}	5,20	5,41	6,00
	I_{cp}	6,31	6,29	6,75
I_B , А		± 143	± 106	± 110
Период проворота ротора, с		13,6	13,8	11,8

Из анализа приведенных данных следует, что средние и экстремальные значения тока статора и активной мощности, рассчитанные для турбогенератора ТГВ-200, в меньшей степени отличаются от соответствующих экспериментальных данных, чем для генератора ТГВ-200М. Исключение составляет минимальное значение тока статора при колебаниях ротора. Максимальная погрешность в определении тока статора и активной мощности не превышает 13,3%.

При расчете тока в обмотке возбуждения большая погрешность имеет место для генератора ТГВ-200 и составляет 30%. Для ТГ типа ТГВ-200М ошибка в определении максимального значения тока ОВГ не превышает 3,6%.

Поскольку даже в установившемся асинхронном режиме имеет место значительная пульсация в скорости вращения ротора, то установить точное значение среднего скольжения достаточно сложно. Поэтому в работе оценивались расчетные и экспериментальные значения времени одного проворота ротора относительно электромагнитного поля статора. Как следует из таблицы, расчетные значения этого параметра для исследуемых генераторов оказались близкими. Наибольшее несовпадение с опытным значением составляет 16,9% для турбогенератора ТГВ-200М.

Выводы.

1. Выполненный анализ свидетельствует об удовлетворительном отображении динамических свойств массивного ротора турбогенератора мощностью 200 МВт, полученных различными способами.

2. Сравнение результатов расчета асинхронных характеристик, полученных на основе различной

информации, а также переходных процессов при асинхронном ходе турбогенераторов мощностью 200 МВт серии ТГВ с данными натурных испытаний подтверждает эффективность использования экспериментальных совокупностей электромагнитных параметров генераторов, определенных различными методами, для исследования аномальных режимов.

3. Предложен единый подход к математическому моделированию переходных процессов при использовании сложных эквивалентных схем замещения различной структуры путем их предварительного преобразования к виду, удобному для моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.
2. Rogozin G.G. Determining the electromagnetic parameters of AC machines // Revu general de l'electricite. – 1993. – N9. – P. 8-16.
3. Kazuo Shima, Kazumasa Ide, Miyoshi Takahashi. Analysis of magnetic saturation in a salient-pole synchronous machine after sudden three-phase short circuit // Electrical Engineering in Japan, v 145, n 4.- December. - 2003. - P. 46-55.
4. Рогозин Г.Г., Заболотный И.П. Параметры эквивалентных контуров схем замещения ротора обобщенного турбогенератора // Электротехника. – 1980. - №5. – С. 5-10.
5. Якушов В.М. Операторные сопротивления ротора турбогенератора и их использование для определения электромагнитных параметров // Электричество. - 1992. - №2. – С.23-30.
6. Казовский Е.Я., Рогозин Г.Г., Горин В.Я. Исследование частотных характеристик турбогенераторов // Электротехника. - 1975. - №1. – С. 9-13.
7. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 73 с.
8. Испытания турбогенератора ТГВ-200 Бурштынской ГРЭС в асинхронном режиме: Отчет о НИР / Южное отделение ОРГРЭС. – Львов, 1968. – 45 с.
9. Лернер Л.Г. К вопросу об интегрировании уравнений Горева-Парка // В кн. Автоматизация вычислений и обработки информации в крупном электромашиностроении. – ВНИИЭлектромаш, Л. – 1976. С. 41-45.
10. Ларин А.М., Гуедиди Фаузи Бен Килани Преобразование сложных эквивалентных схем замещения турбогенераторов к виду, удобному для моделирования переходных процессов // Вісник Східноукраїнського нац. ун.-ту. - 2007. - №11 (117).- Частина 1. - С. 108-115.
11. Ларин А.М., Ткаченко А.А., Ларина И.И. Определение электромагнитных параметров обмотки возбуждения синхронного генератора из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания // Електротехніка і електромеханіка.– 2005.- №2. – С. 52-58.

Стаття надійшла 01.04.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькінім Д.Й.