

на интервале  $(\pi, 2\pi)$  изменения параметра  $\varphi$ . Используя метод Ньютона для решения неявной системы нелинейных уравнений (6) при  $\varphi = \varphi_0 \in (\pi, 2\pi)$ , находим начальные условия  $\nu_0$  и  $k_0^c$  для реализации процедуры численного интегрирования системы линейных дифференциальных уравнений (7). Для численной реализации процедуры построения границы области устойчивости и метода Ньютона потребовалось нахождение значений частных производных функций  $A_1$  и  $A_2$  в точках на интервале  $(\pi, 2\pi)$  по переменным  $\varphi$ ,  $\nu$  и  $k^c$ . Эти производные находятся как решения специальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Предложенная процедура вычисления производных позволила реализовать метод Ньютона и метод численного интегрирования с большей точностью.

При анализе результатов проведенных расчетов были изучены факторы, оказывающие существенное влияние на процесс фрезерования. Полученные результаты сравнивались с расчетами, выполненными Шильманом С.В. [3]. Также были проведены расчеты в том случае, когда границу области устойчивости можно построить аналитически используя метод  $D$  – разбиения и сравнить с результатами численного моделирования [5]. Анализ полученных результатов показал хорошую точность и скорость вычислений алгоритма численного построения границы области устойчивости.

## Список литературы

1. *Hohn R. E., Long G. W., Sridhar R.*, A stability algorithm for special case of the milling process. Contribution to machine tool chatter research – 6. // Journ. of Engineering for Industry Trans. of the ASME, ser. B, v.90, №2, 1968.
2. *Sridhar R., Hohn R. E., Long G. W.*, Contribution to machine tool chatter research – 5,7. // Journ. of Engineering for Industry Trans. of the ASME, ser. B, v.90, №2, 1968.
3. *Шильман С. В.* Метод производящих функций в теории динамических систем. М.: Наука.1978.
4. *Шиманов С. Н.* Устойчивость линейных систем с периодическими коэффициентами и запаздыванием. Свердловск: УрГУ. 1982.
5. *Долгий Ю. Ф.* Устойчивость периодических дифференциально-разностных уравнений. Екатеринбург: УрГУ.1996.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СРЕДСТВАМИ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

**Ю.Д. Филипчик, Е.В. Калентионок**

Белорусский национальный технический университет

Независимости 65, 2200013 Минск, Беларусь

[elsyst@tut.by](mailto:elsyst@tut.by)

Для надежного функционирования электроэнергетики необходимо обеспечить устойчивость параллельной работы электростанций и энергосистем. Нарушение их устойчивости приводит к погашению большого числа потребителей электроэнергии, повреждению оборудования и другим отрицательным последствиям [1].

Со всей остротой проблема обеспечения устойчивости в Белорусской энергосистеме встала после начала строительства Лукомльской ГРЭС. Это связано с большой единичной мощностью блоков, уменьшением постоянной механической инерции и увеличением реактивных сопротивлений. Для обеспечения надежности работы была разработана и установлена на Лукомльской ГРЭС специальная автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ). Однако, несмотря на принятые меры, предотвратить крупную системную аварию не удалось. В 1979 году из-за аварийного отключения ряда линий электропередачи, несовершенства и отказа устройств противоаварийной автоматики были погашены крупные электростанции (Березовская ГРЭС, Минская ТЭЦ-3), а также потребители городов Минск, Брест, Гродно, Барановичи, Молодечно, Лида [2].

В 90-е годы прошлого столетия из-за уменьшения электропотребления проблема обеспечения устойчивости временно стала не столь острой, хотя с вводом ВЛ-750 кВ на ПС "Белорусская" была спроектирована и введена локальная противоаварийная автоматика, действующая в основном на отключение потребителей при отключении ВЛ-750 кВ и передачи по ней определенной мощности.

В настоящее время актуальность обеспечения устойчивости средствами противоаварийного управления возрастает. Это связано, прежде всего, с четырьмя факторами: 1. ростом нагрузки энергосистемы; 2. реконструкцией ряда электростанций; 3. включения на параллельную работу с энергосистемой Украины; 4. предстоящим строительством атомной электростанции с блоками номинальной мощностью 1000 МВт.

Поэтому разработка теоретических положений и технических принципов противоаварийного управления (ПУ) для обеспечения устойчивости Белорусской энергосистемы в современных условиях является весьма актуальной задачей.

По мере усложнения режимов и схемы основной системообразующей сети мощной единой энергосистемы увеличивается протяженность систем централизованного противоаварийного управления. Расширение границ ПУ ведет к усложнению структуры схем устройств и снижению быстродействия и показателей надежности, утяжелению условий их эксплуатации. Поэтому становится очевидным, что обеспечение устойчивости одним централизованным устройством ПУ нереально [3]. Поэтому наиболее рационально систему ПУ построить, используя иерархический принцип. Нижний уровень подсистемы ПУ образуют узловые комплексы, довольно "самостоятельные решающие задачи устойчивости по выдаче мощности крупных электростанций, связи остродефицитных энергоузлов или энергосистем с энергообъединениями. Более высокий уровень представляют районные комплексы, осуществляющие ПУ межсистемными и системообразующими связями. Дальнейший уровень подсистемы образуют региональные комплексы, задачей которых является координация действия районных комплексов, входящих в состав данной энергетической системы. Верхний уровень иерархии составляет координирующий комплекс энергообъединения.

Систему предотвращения нарушения устойчивости целесообразно создавать как четырехуровневую иерархическую структуру:

уровень 1 — локальные агрегатные и исполнительные устройства реализующие команды поступающие от узлового устройства;

уровень 2 — узловое устройство района противоаварийного управления, созданного в виде централизованного комплекса, предназначенного для динамической и статической устойчивости энергосистемы;

уровень 3 — системное устройство, которое выполняет координацию комплексов уровня 2 и обеспечивает сохранение статической и динамической устойчивости объединенной энергосистемы (ОЭС);

уровень 4 — центральное устройство энергообъединения, которое выполняет координацию уровня 3, а через него и уровня 2, контролирует основные межсистемные связи и обеспечивает статическую устойчивость всего энергообъединения или некоторой ее части.

Основными принципами построения иерархической системы ПУ являются следующие: 1) межуровневое взаимодействие комплексов должно осуществляться преимущественно между комплексами смежного иерархического уровня; 2) взаимодействие территориально смежных комплексов одного иерархического уровня может осуществляться с помощью комплекса более высокого уровня иерархии или непосредственно между ними с представлением необходимой информации на более высокий уровень; 3) исполнительные команды, поступающие от комплексов более высокого уровня, в отношении объемов управляющих воздействий и их быстродействия являются обязательными для исполнения на данном уровне; 4) комплексы ПУ, имеющие общие пусковые факторы с комплексами смежного более высокого иерархического уровня, осуществляют управляющие воздействия самостоятельно с представлением последним информации о предварительно сформированной дозировке воз-

действий или с передачей им сигналов о реализованных воздействиях при срабатывании соответствующих пусковых органов; 5) комплексы ПУ любого уровня исходя из условий устойчивости контролируемых ими связей или заданий, полученных от комплексов вышестоящего уровня, задают комплексам более низкого уровня максимально допустимый небаланс мощности управляющих воздействий.

Для выполнения возложенных задач на противоаварийное управление осуществляются различные виды воздействий на энергосистему:

- отключение части генераторов;
- форсировка возбуждения синхронных генераторов и продольно-емкостной компенсации линий электропередачи;
- отключение шунтирующих реакторов или изменение реактивной мощности управляемых реакторов;
- кратковременную или длительную разгрузку турбин электростанций;
- частотный пуск гидрогенераторов;
- перевод гидрогенераторов из режима синхронного компенсатора в режим выдачи активной и реактивной мощности;
- электрическое торможение агрегатов электростанций путем включения нагрузочных активных сопротивлений;
- деление электрической сети для прекращения или предотвращения асинхронного хода, изменения потокораспределения в сети;
- отключение части нагрузки потребителей;
- изменение уставки автоматического регулирования возбуждения по напряжению.

## Список литературы

1. Калентионок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. Минск: Техноперспектива, 2008.
2. Филипчик Ю.Д., Калентионок Е.В. Крупные системные аварии. Причины их возникновения и развития //Энергетика и ТЭК. 2007. № 5. С. 46–49.
3. Совалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. М.: Энерго-атомиздат, 1988.

## ВИЗУАЛЬНАЯ СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

**Р.И. Фурунжиев, Н.Н. Гурский**

Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости 65, 220013 Минск, Беларусь  
reshat@tut.by

В настоящее время ощущается потребность в создании математических и программных средств, позволяющих исследователю/проектировщику рассмотреть с единых позиций широкий спектр вопросов моделирования, анализа и оптимизации мехатронных систем, в общем случае нелинейных. Достаточно широкие возможности предоставляет программный продукт ADAMS. Однако подготовка объектов к моделированию и оптимизации занимает много времени. Кроме того, требуется высокая квалификация пользователей ADAMS.

В докладе обсуждаются теоретические основы, математические модели и алгоритмы, которые положены в основу разработанного авторами комплекса ADMOS. Комплекс позволяет в удобной форме варьировать классы объектов, решаемых задач, возмущений. Для выбранного класса объектов представляется возможным задавать пространственные математические модели, структуры подвесок, массово-геометрические параметры, нелинейные