

---

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ МАШИН РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В СЕТЯХ MICROGRID НА ПАК RTDS

---

**Базлов Дмитрий Александрович**

студент магистратуры

Институт автоматизации и электронного приборостроения

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н.

Туполева-КАИ», Казань, Россия

---

В статье рассматривается моделирование синхронных машин малой мощности на ПАК RTDS. Ввиду активного роста числа объектов малой генерации в настоящее время возникает необходимость исследования технических моментов работы электроэнергетической системы, включающей в себя установки распределенной генерации. С учетом того, что для полного исследования работы необходимо моделирование работы таких установок, то целью данной работы является формирование имитационных моделей синхронных машин малой мощности для дальнейших исследований по повышению устойчивости одновременной работы установок распределенной генерации в энергетической системе.

---

*Ключевые слова:* синхронная машина, распределенной энергетика, дизельный генератор, газотурбинная установка, газопоршневая установка

---

## DEVELOPMENT OF IMITATION MODELS OF SYNCHRONOUS MACHINES OF DISTRIBUTED GENERATION IN MICROGRID NETWORKS ON PACS RTDS

---

**Dmitry A. Bazlov**<sup>1</sup>

master's program student

Institute of Automation and Electronic Instrument Engineering

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI

Kazan, Russian Federation

---

<sup>1</sup> Supervisor: Ruslan G. Isakov, Ph.D., associate professor

ABSTRACT

Simulation of low-power synchronous machines on the RTDS PAC is considered in the article. In view of the active growth in the number of small-scale generation facilities, it is now necessary to investigate the technical aspects of the operation of the electric power system, which includes distributed generation facilities. Taking into account the fact that for the full study of the work it is necessary to simulate the operation of such plants, the aim of this work is the formation of simulation models of synchronous low-power machines for further research on increasing the stability of simultaneous operation of distributed generation systems in the power system.

**Keywords:** synchronous machine, distributed power engineering, diesel generator, gas turbine installation, gas piston installation

**Введение**

Установки распределенной генерации в сетях microgrid обычно представляют собой энергоагрегаты малой генерации, хранения и потребления электрической энергии, которые расположены на низком уровне распределения напряжения и используются для одновременной параллельной работы с электроэнергетической системой или в изолированном режиме.

**1. МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Структурно блок-схема и модель на RTDS дизельного двигателя показана на рисунках 1 и 2 соответственно.

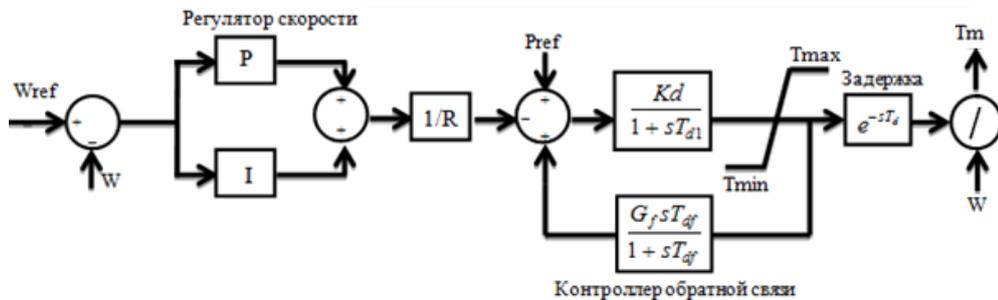


Рисунок 1 – Структурная блок-схема дизельного двигателя [2]

Входными сигналами в модели являются единица задания скорости  $\omega_{ref}$  и единица скорости дизельного генератора  $W$ . Управляющий сигнал для изменения момента двигателя определяется разностью скорости или частоты вращения, в результате чего производится регулирование крутящего момента. Для стабилизации сформированного скоростного режима дизельного двигателя в схему включен регулятор скорости, действующий на сигнал отклонения скорости и, следовательно, частоту синхронного генератора, подключенного к двигателю. Регулятор скорости выполнен при помощи пропорционально-интегрального ПИД-регулятора, который реализуется с помощью функции опережения-запаздывания [2, 3].

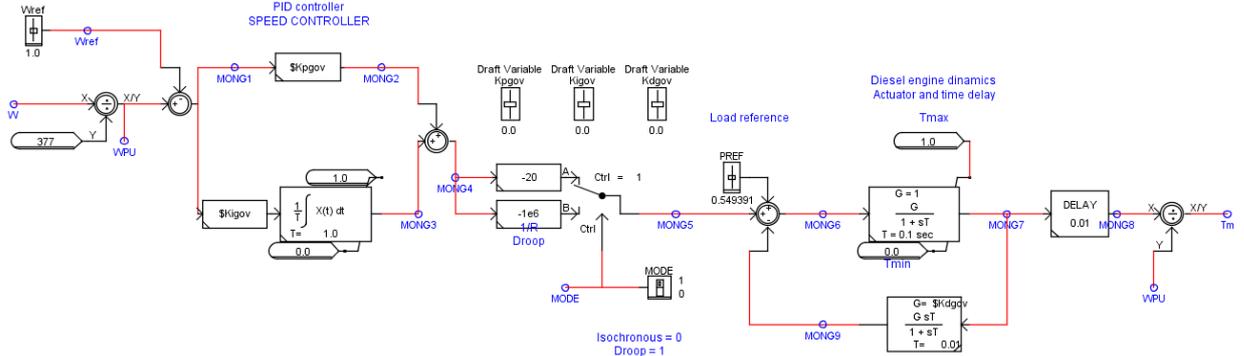
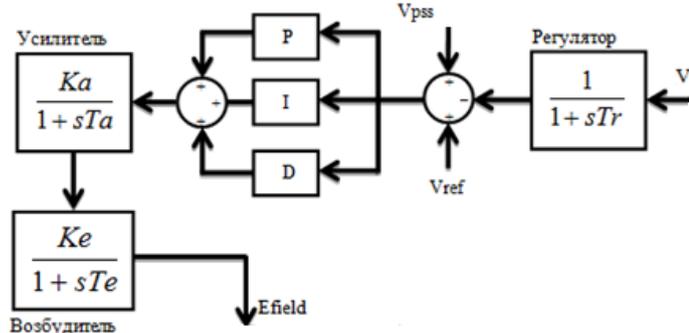


Рисунок 2 – Модель дизельного двигателя и регулятора скорости в RSCAD/Draft

## 2. МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Моделируемый генератор оснащен АРВ пропорционального действия, моделируемого упрощенной моделью. Основной ролью автоматического регулятора возбуждения является обеспечение постоянного тока в обмотках генератора и регулирование напряжения на зажимах генератора до заданного опорного значения. Общая блок-схема и модель АРВ дизельного генератора показана на рисунках 3, 4 соответственно.



- $V_{ref}$  – опорный входной сигнал напряжения;
- $V_{pss}$  – сигнал системного стабилизатора;
- $V_t$  – единица напряжения на клеммах синхронного генератора;
- $K_a$  – коэффициент усиления регулятора возбуждения;
- $T_a$  – постоянная времени регулятора;
- $K_e$  – коэффициент усиления возбудителя;
- $T_e$  – постоянная времени возбудителя;
- $E_{field}$  – выходной сигнал регулятора возбуждения генератора.

Рисунок 3 – Структурная блок-схема АРВ дизельного двигателя [4]

Общий сигнал на входном сумматоре формируется как

$$\Delta U_{\Sigma} = K_{0U} (U_0 (1 + \alpha \cdot S_U)) - K_{1U} \frac{dU}{dt} - K_{1if} \frac{dE_q}{dt} + K_{0f} (S_U + S_{UT}) + K_{1f} \frac{dS_U}{dt} + U_{доп.2})$$

- где  $K_{0U}$ ,  $K_{1U}$ ,  $K_{1if}$ ,  $K_{0f}$ ,  $K_{1f}$  – коэффициенты регулирования;
- $U_0$  – напряжение на генераторе в установившемся режиме;
- $\alpha$  – коэффициент, позволяющий учесть изменение уставки по напряжению в корректорах напряжения от частоты;
- $S_{UT}$  – скольжение вектора напряжения, используемое для формирования сигнала по отклонению частоты от предшествующего значения.

Для получения производных  $U, E_q, S_{UT}$  используются реально дифференцирующие звенья вида

$$\frac{p}{1 + T_p} \tag{3}$$

где  $T$  – постоянная времени дифференцирующего звена.

Типичные диапазоны, используемые для выбора параметров возбудителя, усилителя и преобразователя напряжения сведены в таблицу 1 [2].

Таблица 1

**Параметры регулятора возбуждения (АРВ)**

Параметр	Значение или диапазон
Постоянная времени преобразователя напряжения $T_r$	0,01-0,2 сек
Коэффициент усиления усилителя $K_a$	10-400
Постоянная времени усилителя $T_a$	0,02-0,1 сек
Коэффициент усиления возбудителя $K_e$	1
Постоянная времени возбудителя $T_e$	0,01-0,5 сек

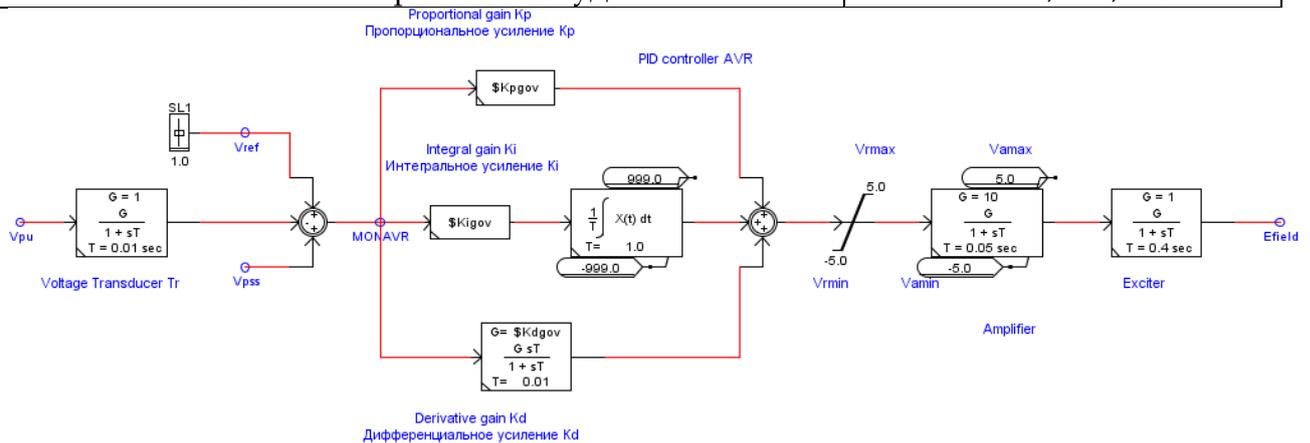


Рисунок 4 – Модель автоматического регулятора возбуждения в RSCAD/Draft

### 3. МОДЕЛЬ СТАБИЛИЗАТОРА АРВ синхронного генератора

Стабилизаторы энергосистемы (PSS) обычно используются для обеспечения вспомогательного стабилизирующего сигнала в системе возбуждения синхронного генератора. Стабилизатор модели обеспечивает наличие сигнала  $V_{pss}$  в системе АРВ дизельного синхронного генератора. Общая блок-схема и модель регулятора PSS, реализованная в данной работе показана на рисунках 5, 6 соответственно.

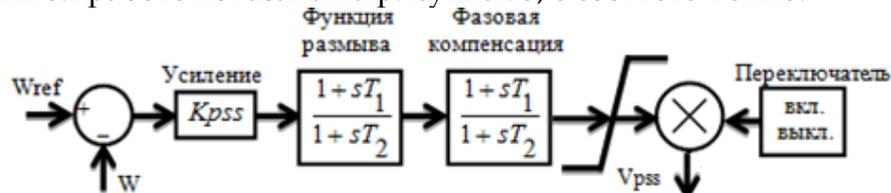


Рисунок 5 – Общая блок-схема стабилизатора АРВ синхронного генератора в RSCAD/Draft

Компоненты регулятора включают в себя коэффициент усиления для обеспечения адекватного затухания колебаний ротора генератора без ущерба для стабильности энергосистемы. При этом далее выполнен фильтр размыва, который обеспечивает реакцию регулятора PSS на колебания скорости, связанные с колебаниями частоты ротора. Следующий

блок – фазовой компенсации позволяет вносить фазовые сдвиги во входные сигналы с заранее определенными пределами. Ограничения, выполненные с помощью постоянных времен  $T_1$  и  $T_2$  применяются для компенсации фазового сдвига между крутящим моментом генератора и входным сигналом возбуждения с сохранением приемлемого переходного процесса. Реализация вышеизложенной структуры регулятора APB (PSS) в RSCAD/Draft показана на рисунке 6.

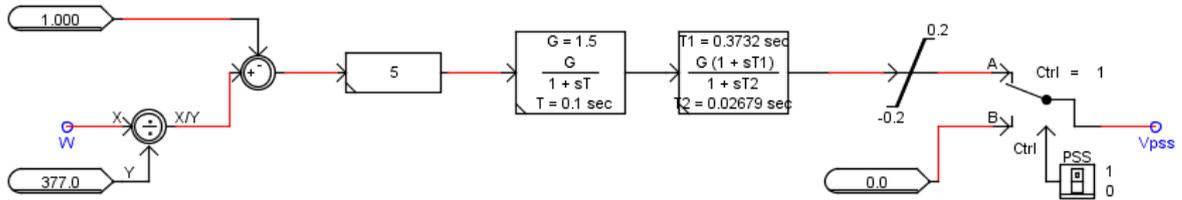


Рисунок 6 – Модель стабилизатора (PSS) APB генератора в RSCAD/Draft

Типичные диапазоны, используемые для выбора параметров стабилизатора APB сведены в таблицу 2 [2].

Таблица 2

Параметры стабилизатора APB

Параметр	Значение или диапазон
Коэффициент усиления	1-400
Постоянная времени вымывания $T_w$	1,5 сек
Фазовая компенсация $\varphi_m$	30-60 (в градусах)
Пределы PSS	$\pm 0,2$ о.е.

#### 4. МОДЕЛЬ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Газотурбинная установка обычно состоит из осевого компрессора, камеры сгорания и турбины. Воздух, поддерживающий процесс горения, сжимается через компрессор, затем смешивается с топливом в камере сгорания, где происходит процесс сжигания. Процесс горения производится под постоянным давлением. Наконец рабочая жидкость (обычно воздух) охлаждается также под постоянным давлением. Кратко схема управления газовой турбины приведена на рисунке 7, где  $W_a$  – воздушный поток (в о.е.),  $\omega_c$  и  $\Delta\omega_c$  – единичная безразмерная скорость и изменение безразмерной скорости (в о.е.) соответственно,  $T_a$  – текущая температура окружающего воздуха,  $P_a$  – текущее давления,  $\theta_{IGV}, \theta_0, \theta_{MAX}$  – текущий, начальный и максимальный угол открытия направляющей лопатки соответственно [4].

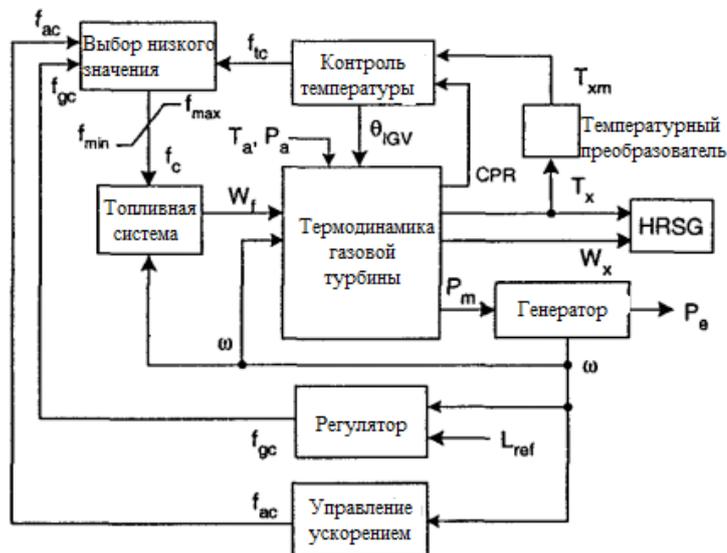


Рисунок 7 – Схема управления газовой турбины

Модель газовой турбины, представленная на рисунке 8, предлагает три постоянные времени – одна для представления отклика топливного клапана ( $T_1$ ), вторая для представления отклика турбины ( $T_2$ ) и третья - для представления отклика предельного значения нагрузки ( $T_3$ ) [5, 6].

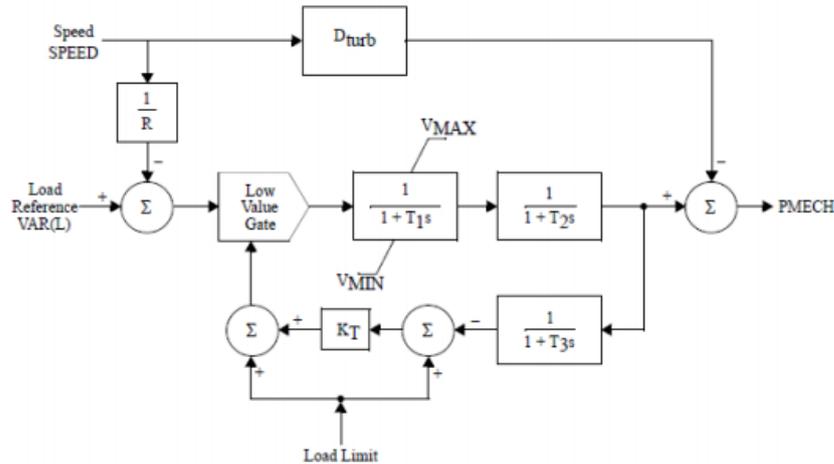


Рисунок 8 – Структурная блок-схема газовой турбины

Реализация вышеизложенной структуры газовой турбины в RSCAD/Draft показана на рисунке 9.

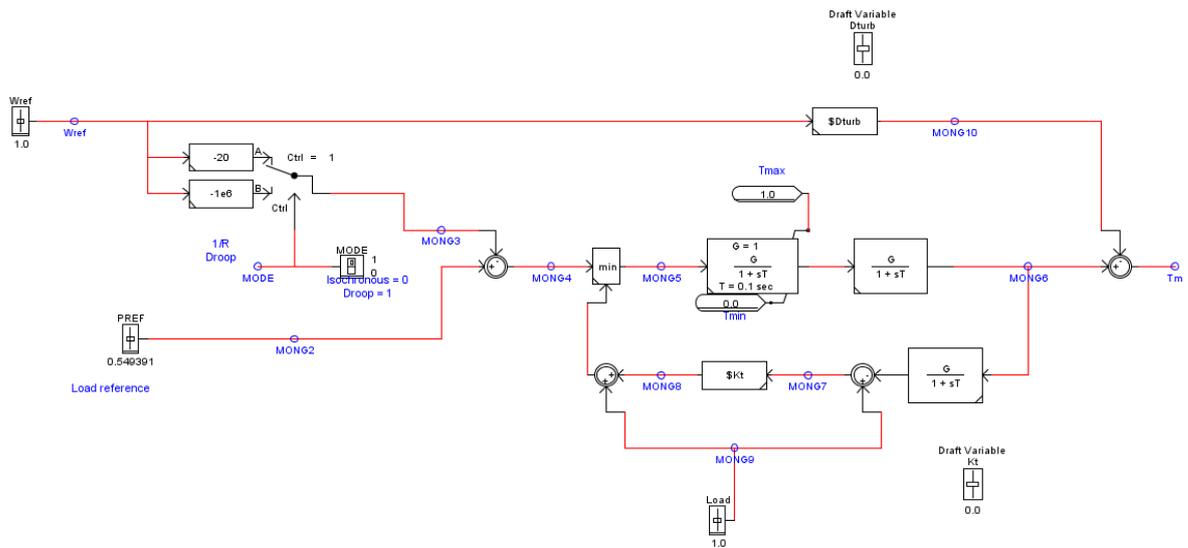


Рисунок 9 – Модель газовой турбины в RSCAD/Draft

Для реализации моделей АРВ газотурбинной установки и регулятора АРВ (PSS) возможно использование моделей, аналогичных рассмотренным для дизельного генератора, описанных на рисунках 1-6, соответственно.

### 5. МОДЕЛЬ ГАЗОПОРШНЕВОЙ УСТАНОВКИ

Газопоршневую установку при моделировании в RTDS возможно представить при помощи стандартных встроенных моделей регуляторов АРВ и стабилизаторов генератора, основанных на ПИД законе регулирования. В электрической модели помимо модели синхронной машины были приняты стандартные схемы IEEE регулятора АРВ и стабилизатора АРВ, использующихся на генераторах газопоршневых энергоагрегатов (рисунок 10) [8].

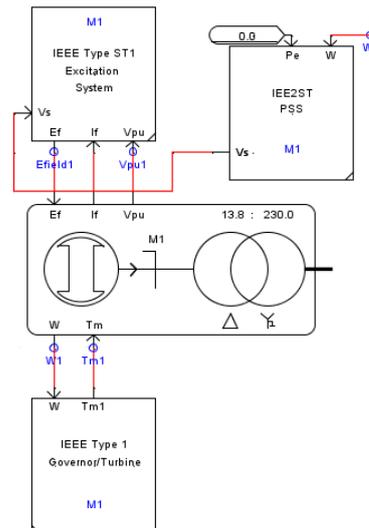


Рисунок 10 – Модель газопоршневой установки

### Результаты

Особенности работы энергосистемы с установками распределенной генерации в настоящее время не изучены полностью и требуют рассмотрения. Данная работа включает в себя разработку и моделирование структурных схем и моделей синхронных машин малой мощности различных типов. В будущем объем данной работы позволит выполнять анализ защиты для методов работы распределенной генерации параллельно с энергосистемой и в изолированном режиме, поскольку растет спрос на альтернативные источники энергии. Также будущая разработка заключается в изучении на основе данных моделей защиты и анализа динамической устойчивости работы установок при подключении их к электрической сети и при работе в изолированном режиме.

### Список литературы

1. «Global Wind Statistics 2011. 07.02.2012. Глобальный совет по ветроэнергетике. Брюссель, Бельгия, 2012. - 4 с.
2. Onyinyechi Nzimako, Athula Rajapakse, «Моделирование в реальном времени сетей microgrid с несколькими распределенными энергетическими установками», IEEE RTDS Technologies, Виннипег, Канада, - 7с.
3. G. Joos, B.-T. Ooi, D. T. McGillis, F. D. Galiana и R. J. Marceau, «Потенциал распределенной генерации для предоставления вспомогательных услуг» на Летней встрече энергетического общества в 2000 году. IEEE, Сиэтл, WA, 2000.
4. Kundur, Устойчивость и контроль энергосистемы, Нью-Йорк: Макгроу-Хилл.
5. X. Саадат, Анализ энергетической системы, Милуоки: Макгроу-Хилл, 2002.
6. Клейн М., Роджерс Г. Дж., Мурти С., Кундур П. «Применение стабилизаторов силовой системы для повышения общей устойчивости системы», «Межзонные колебания в энергетических системах», IEEE Power Engineering Society, 95 TP 101, октябрь 1994, с. 131 143.

### References

1. «Global Wind Statistics 2011. 07.02.2012. Global wind energy council. Brussels, Belgium 2012. - 4 p.
2. Onyinyechi Nzimako, Athula Rajapakse, "Real Time Simulation of a Microgrid with Multiple Distributed Energy Resources", IEEE RTDS Technologies, Winnipeg, Canada, - 7с.
3. G. Joos, B.-T. Ooi, D. T. McGillis, F. D. Galiana and R. J. Marceau, "The potential of distributed generation to provide ancillary services," in Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Seattle, WA, 2000.
4. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill.
5. H. Saadat, Power System Analysis, Milwaukee: McGraw-Hill, 2002.

6. Klein M., Rogers G.J., Moorty S., Kundur P. "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability","Inter-Area Oscillations In Power Systems", IEEE Power Engineering Society, 95 TP 101, October 1994, pp. 131 143.