

Научная статья
УДК 621.311.1
doi: 10.34822/1999-7604-2022-1-16-22

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С РЕЗИСТИВНЫМ ЗАЗЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

Леонид Вячеславович Владимиров^{1✉}, Геннадий Викторович Иванов²,
Евгений Юрьевич Кислицин³

^{1,2,3}Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹vladimirov_lv@surgu.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0001-6026-3679>

²ivanov_gv@surgu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8640-9605>

³kislitsin_eu@surgu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9747-3917>

Аннотация. Режим резистивного заземления нейтрали используется в распределительных электрических сетях и имеет ряд преимуществ по сравнению с изолированной нейтралью. Как правило, при однофазном замыкании на землю в месте повреждения присутствует переходное сопротивление, величина которого может изменяться в широких пределах. Проведено исследование влияния переходного сопротивления на процессы при однофазном замыкании на землю, представлены результаты моделирования этого режима в сети с резистивным заземлением нейтрали при различных значениях переходного сопротивления.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, резистивное заземление нейтрали, переходное сопротивление

Для цитирования: Владимиров Л. В., Иванов Г. В., Кислицин Е. Ю. Влияние переходного сопротивления при однофазном замыкании на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали // Вестник кибернетики. 2022. № 1 (45). С. 16–22. DOI 10.34822/1999-7604-2022-1-16-22.

Original article

TRANSITION RESISTANCE EFFECT DURING A SINGLE PHASE-TO-GROUND FAULT IN THE NETWORK WITH RESISTIVE GROUNDING OF THE NEUTRAL

Leonid V. Vladimirov^{1✉}, Gennadiy V. Ivanov², Evgeniy Yu. Kislitsin³

^{1,2,3}Surgut State University, Surgut, Russia

¹vladimirov_lv@surgu.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0001-6026-3679>

²ivanov_gv@surgu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8640-9605>

³kislitsin_eu@surgu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9747-3917>

Abstract. The resistive grounding of the neutral is used in power distribution networks and has several advantages over the insulated one. As a rule, transition resistance is occurring at a fault location during a single phase-to-ground fault. The value of the resistance can vary widely. The transition resistance effect on the processes occurring during a single phase-to-ground fault is studied. The article presents the results of simulating the mode in the network with resistive grounding of the neutral at various transition resistance values.

Keywords: power distribution networks, resistive grounding of the neutral, transition resistance

For citation: Vladimirov L. V., Ivanov G. V., Kislitsin E. Yu. Transition Resistance Effect during a Single Phase-to-Ground Fault in the Network with Resistive Grounding of the Neutral // Proceedings in Cybernetics. 2022. No. 1 (45). P. 16–22. DOI 10.34822/1999-7604-2022-1-16-22.

ВВЕДЕНИЕ

Выбор режима работы нейтрали в отечественных распределительных сетях определяется уровнем токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) и регламентируется п. 1.2.16 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [1]. Согласно действующей редакции ПУЭ возможна работа сети с изолированной нейтралью или нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор.

Режим работы нейтрали определяет уровень тока ОЗЗ в месте повреждения, возможный уровень перенапряжений на фазах, требования к фазной и линейной изоляции электрооборудования, устройство и принципы действия релейной защиты от ОЗЗ, вероятность возникновения феррорезонанса при неустойчивом (дуговом) характере замыкания в месте повреждения.

Наиболее часто в распределительных сетях используется режим изолированной нейтрали, поскольку в большинстве случаев емкостные токи не превышают установленных пределов. Для реализации изолированной нейтрали не требуется дополнительных технических решений, одно из ее преимуществ – возможность работы сети при ОЗЗ, снижающем количество перерывов в электроснабжении потребителей.

Однако недостатки такого режима работы нейтрали более весомы. При ОЗЗ релейная защита действует на сигнал и фиксирует наличие «земли» на секции шин. Реализация других видов защит – сложное и дорогостоящее мероприятие. При неустойчивых ОЗЗ, которые сопровождаются перемежающейся дугой в месте повреждения, велика вероятность возникновения феррорезонанса и недопустимого уровня перенапряжений на неповрежденных фазах, что, в свою очередь, приводит к резкому снижению сроков службы изоляции, а также повреждению электрооборудования, в частности измерительных трансформаторов напряжения. Из-за длительного присутствия ОЗЗ увеличивается вероятность дальнейшего развития повреждения и перехода его в двухфазное замыкание, или двойное замыкание на землю [2].

Компенсация емкостных токов имеет ограниченную область применения. Соглас-

но требованиям ПУЭ установка дугогасящих реакторов (ДГР) обязательна, если уровень токов ОЗЗ превышает установленные пределы. При этом предпочтительна установка плавнорегулируемых ДГР с системой автоматического управления. Кроме того, при установке ДГР предъявляются высокие требования по несимметрии, которым в большей степени удовлетворяют сети, выполненные кабельными линиями. Все вышеперечисленное свидетельствует, что универсальное решение при выборе режима работы нейтрали пока не выработано и к этому вопросу необходимо подходить более взвешенно [3–4].

Большой интерес с точки зрения ограничения уровня перенапряжений представляет резистивное заземление нейтрали, которое нашло широкое применение в мировой практике. При этом стоит отметить, что в отечественной нормативной документации не представлены какие-либо критерии применения резистивного заземления, кроме стандартов организаций [3]. При заземлении нейтрали через резистор практически полностью исключается возможность возникновения перемежающейся дуги при ОЗЗ и за счет более высокой скорости перезарядки емкостей фаз ограничиваются возникающие при этом перенапряжения на поврежденной и неповрежденных фазах (до 1,8–2,2 U_{ϕ}), снижается кратность бросков емкостного тока, возможно использование простых токовых защит для отходящих присоединений. Применение резистивного заземления нейтрали позволяет также значительно снизить вероятность появления феррорезонанса в электрической сети [5–7].

Но, несмотря на все положительные свойства, стоит отметить и недостатки резистивного заземления, такие как увеличение тока в месте ОЗЗ, необходимость отключения поврежденного присоединения, наличие на подстанции элементов с высокой допустимой температурой нагрева.

Комбинированное заземление нейтрали можно рассматривать как перспективный вариант решения задачи заземления нейтрали, но при этом в действующей редакции ПУЭ этот режим нейтрали не обозначен [1].

Переходное сопротивление $R_{пер}$ оказывает значительное влияние в сетях, выполненных воздушными ЛЭП, в том числе и в сетях с резистивно заземленной нейтралью. При этом значение переходного сопротивления определяется сопротивлением следующих основных элементов петли ОЗЗ:

- поврежденного линейного изолятора;
- заземляющего устройства опоры с поврежденным изолятором;
- грунта;
- заземляющего устройства на подстанции.

Повреждение или разрушение линейного изолятора возможно в результате внешнего механического воздействия, электрического пробоя, при этом переходное сопротивление ориентировочно составляет 100–200 Ом, что может оказывать влияние на процессы, протекающие при ОЗЗ. В случае обрыва провода и его падения переходное сопротивление в месте повреждения определяется сопротивлением грунта или снежного покрова, а также климатическими факторами и влажностью окружающей среды. Например, при падении провода на сухой песок переходное

сопротивление может достигать 5–7 кОм, а при падении на обледеневшую землю или в сугроб значение сопротивления может увеличиться в несколько раз [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим влияние переходного сопротивления на процессы, происходящие при ОЗЗ в сети с высокоомным резистивным заземлением нейтрали. При этом активная составляющая тока замыкания на землю сопоставима по величине с емкостным током сети.

На рис. 1 представлена расчетная схема электрической сети с резистивным заземлением нейтрали. На стороне высокого напряжения нейтраль силового трансформатора Т1 и источника питания С заземлена. Поскольку обмотка низкого напряжения силового трансформатора Т1 имеет схему соединения «треугольник», непосредственное включение резистора в нейтраль невозможно. Для этого использован нейтралеобразующий трансформатор Т2. Структурно расчетная схема электрической сети соответствует реальной сети с номинальным напряжением 110/10 кВ.

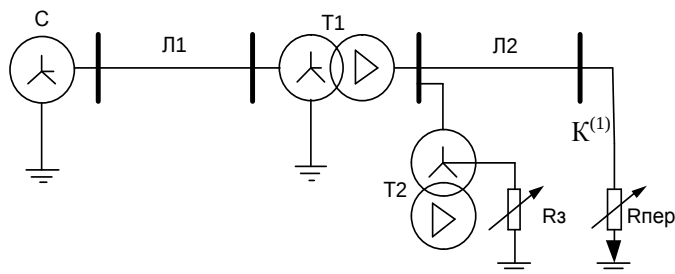


Рис. 1. Схема электрической сети с резистивным заземлением нейтрали

Примечание: составлено авторами.

Исследование влияния переходного сопротивления на процессы при ОЗЗ в сети с резистивным заземлением нейтрали было выполнено с использованием экспериментального стенда, внешний вид которого представлен на рис. 2. Экспериментальный стенд собран с использованием блоков, имитирующих отдельные элементы электрической сети, и получает питание от трехфазной электрической сети. Преимуществом данного решения является возможность изменения параметров отдельных блоков независимо друг от друга, таким образом достигается высокая «гибкость» физической модели сети.

Для заземления нейтрали выбрано значение сопротивления резистора $R_3 = 1$ кОм, но при этом возможно изменение данного значения. Величина емкостных токов прямо пропорциональна емкости линии Л2, которая составляет $C = 0,4$ мкФ. Активное сопротивление и индуктивность линии Л2 – 8 Ом и 0,3 Гн соответственно. Фактические параметры линии определяются ее протяженностью, конструктивным исполнением и сечением проводника. Количество линий, подключенных на стороне низкого напряжения, возможно увеличить, при этом ток ОЗЗ в сети также возрастет. В месте замыкания на

землю фазы «А» присутствует переходное сопротивление $R_{\text{пер}}$, которое ступенчато изменяется в диапазоне от 0 до 1 кОм.

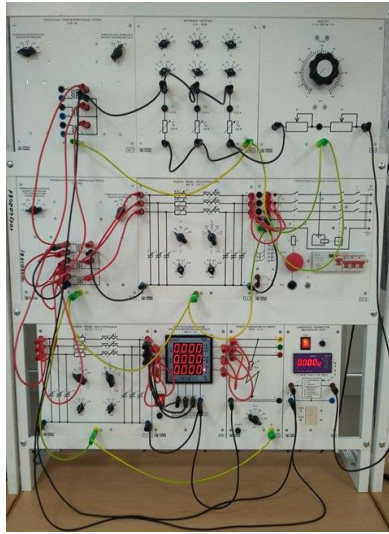


Рис. 2. Экспериментальный стенд
Примечание: фото авторов.

Переходное сопротивление в месте повреждения фазы «А» имитируется блоком (рис. 3а). Для определения величины фазных токов и напряжений использован многофункциональный электроизмерительный прибор МЦ120 (рис. 3б). Другой измери-

тельный прибор – измеритель параметров однофазной электрической цепи – последовательно включен в цепь резистивного заземления и служит для измерения активной составляющей тока ОЗЗ.

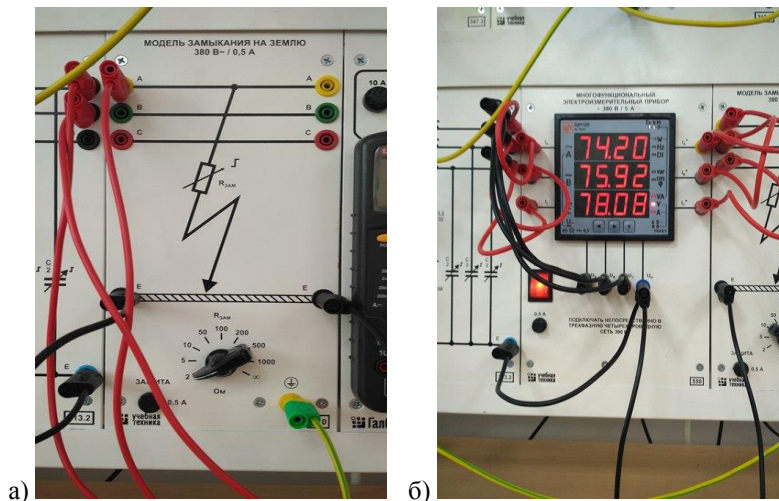


Рис. 3. Модель переходного сопротивления:
а – блок имитации переходного сопротивления; б – электроизмерительный прибор МЦ120
Примечание: фото авторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе выполнения работы был рассмотрен режим ОЗЗ в фазе «А» при отсутствии нагрузки (режим холостого хода). В этом

режиме при переходном сопротивлении $R_{\text{пер}}$ менее 200 Ом можно считать, что замыкание носит характер, близкий к «металлическому». Напряжение на поврежденной фазе

стремится к нулю, а на неповрежденных фазах – к линейному напряжению, т. е. в $\sqrt{3}$ раз больше. При этом междуфазные сопротивления не изменяются. При появлении значений переходного сопротивления $R_{пер}$ более

200 Ом уже наблюдается значительное изменение напряжения на неповрежденной фазе U_a и тока $I_{озз}$. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений при ОЗЗ в фазе «А» (режим холостого хода)

$R_{пер}, \text{Ом}$	0	2	5	10	50	100	200	500	1000	∞
$U_a, \text{В}$	0,60	0,68	0,76	0,92	2,56	4,56	8,92	19,72	34,21	77,82
$U_b, \text{В}$	139	138,8	138,7	138,6	137,4	135,6	132,1	122	106,4	78,44
$U_c, \text{В}$	140,2	140,3	140,2	140,4	140,7	141	141,4	141	137	80,8
$U_{ab}, \text{В}$	139,6	139,7	139,6	139,7	139,6	139,5	139,3	138,6	137,6	136,7
$U_{bc}, \text{В}$	136	136	136	136,1	136	136,1	136	136	135,9	136
$U_{ca}, \text{В}$	140,9	140,9	140,8	141	140,8	140,9	140,8	140,4	139,6	136,3
$I_{озз}, \text{мА}$	45	45	44	44	44	43	42	39	33	0
$U_n, \text{В}$	22,41	22,4	22,38	22,36	22,21	22,02	21,57	20,28	17,99	0
$I_r, \text{мА}$	23	23	23	23	23	23	22	21	18	0

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 4 представлена графическая зависимость напряжения на поврежденной фазе U_a , тока замыкания на землю $I_{озз}$ и напря-

жения на нейтрали (резисторе) U_n от переходного сопротивления $R_{пер}$.

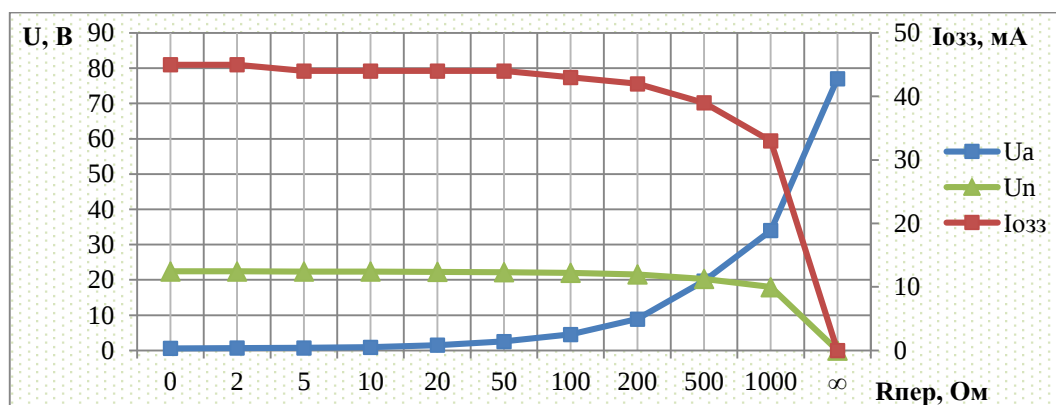


Рис. 4. Зависимость параметров режима ОЗЗ от переходного сопротивления в режиме холостого хода

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Аналогичный опыт был выполнен при наличии нагрузки в конце линии $P = 30 \text{ Вт}$, $Q = 40 \text{ ВАр}$ (нагрузка имела активно-индук-

тивный характер). Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений при ОЗЗ в фазе «А» (при наличии нагрузки)

$R_{пер}, \text{Ом}$	0	2	5	10	50	100	200	500	1000	∞
$U_a, \text{В}$	0,56	0,64	0,72	0,88	2,41	4,40	8,62	18,90	32,80	74,20
$U_b, \text{В}$	133,9	133,9	133,8	133,6	132,2	130,8	127,3	117,6	102,7	75,9
$U_c, \text{В}$	135,2	135,4	135,5	135,5	135,8	136	136,4	136,1	132,3	78,08
$U_{ab}, \text{В}$	134,6	134,6	134,6	134,6	134,5	134,4	134,2	133,7	132,9	132,2

Окончание табл. 2

$R_{пер}, \text{Ом}$	0	2	5	10	50	100	200	500	1000	∞
$U_{bc}, \text{В}$	131,3	131,3	131,2	131,3	131,4	131,3	131,4	131,4	131,5	131,4
$U_{ca}, \text{В}$	135,9	136	136	136	135,8	135,8	135,8	135,5	134,9	131,6
$I_a, \text{мА}$	46	46	46	46	46	47	47	48	49	135
$I_b, \text{мА}$	136	136	136	136	136	136	136	136	136	136
$I_c, \text{мА}$	136	136	136	136	136	136	136	136	136	135
$U_n, \text{В}$	21,57	21,55	21,54	21,52	21,37	21,19	20,79	19,62	17,4	0
$I_r, \text{мА}$	22	22	22	22	22	22	21	20	18	0

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На рис. 5 представлена графическая зависимость напряжения на поврежденной фазе U_a , тока в поврежденной фазе I_a и напряжения на нейтрали U_n от переходного сопротивления

твивления $R_{пер}$. При этом можно сделать вывод, что в этом случае наличие переходного сопротивления также оказывает влияние на параметры ОЗЗ.

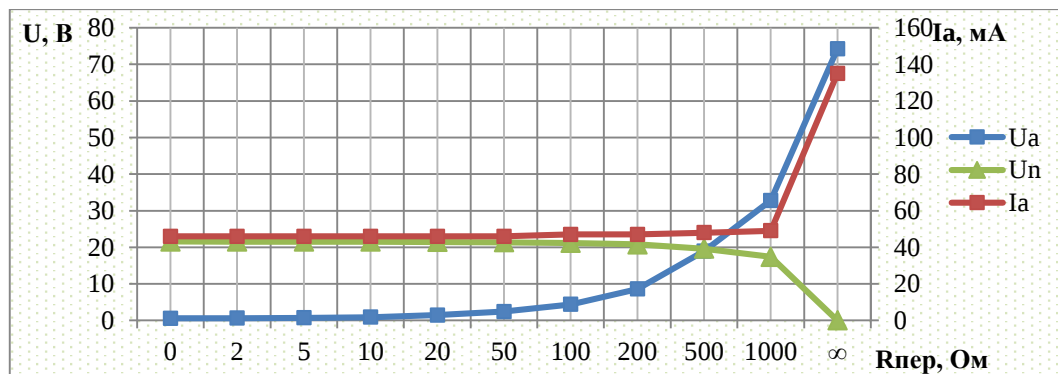


Рис. 5. Зависимость параметров режима ОЗЗ от переходного сопротивления при наличии нагрузки

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов установлено, что наличие переходного сопротивления в месте повреждения может оказывать влияние на величину тока ОЗЗ и напряжения на поврежденной фазе. Также следует

учитывать его влияние на работу защит от ОЗЗ (если таковые имеются) и осложнение процессов поиска места повреждения с применением дистанционных средств и методов.

Список источников

1. Правила устройства электроустановок. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2018. 564 с.
2. Владимиров Л. В., Вырва А. А., Ощепков В. А. и др. Моделирование режима однофазного замыкания на землю в распределительной электрической сети с изолированной нейтралью // Омск. науч. вестн. Сер. 107. Приборы, машины и технологии. 2012. № 1. С. 197–201.
3. Миронов И. А. Проблемы выбора режимов заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ // ЭЛЕКТРОИНФО. Сер. 46. Эксплуатация. 2006. № 5. С. 32–36.
4. Миронов И. А., Кричко В. А. Особенности применения дугогасящих реакторов // Новости электротехники. 2007. № 1 (43). С. 21–24.
5. Шалин А. И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Влияние электрической дуги на направ-

References

1. Pravila ustroistva elektroustanovok. Moscow : Izd-vo NTs ENAS, 2018. 564 p. (In Russian).
2. Vladimirov L. V., Vyrva A. A., Oshchepkov V. A. et al. Modeling the Mode of Single-Phase Ground Short Circuit in Distributive Electrical Network with Isolated Neutral // Omsk Scientific Bulletin. Series 107. Devices, Machines and Technologies. 2012. No. 1. P. 197–201. (In Russian).
3. Mironov I. A. Problemy vybora rezhimov zazemleniia neutrali v setiakh 6–35 kV // ELEKTRO-INFO. Ser. 46. Eksploatatsiia. 2006. No. 5. P. 32–36. (In Russian).
4. Mironov I. A., Krichko V. A. Osobennosti primeneniia dugogasiashchikh reaktorov // Novosti elektrotehniki. 2007. No. 1 (43). P. 21–24. (In Russian).

- ленные защиты // Новости электротехники. 2006. № 1 (37). С. 29–34.
6. Куликова Н. А., Титоренко О. Н., Тяпкина В. А. Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надежности работы электрических сетей 6–35 кВ // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 32–38.
7. Фишман В. Регулирование режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ с использованием принципов Smart Grid // Новости электротехники. 2012. № 5. С. 42–47.
8. Целебровский Ю. В. Области применения различных систем заземления нейтрали // Новости электротехники. 2008. № 4 (52). С. 21–24.
5. Shalin A. I. Zamykaniia na zemliu v setiakh 6–35 kV. Vliianie elektricheskoi dugi na napravlennye zashchity // Novosti elektrotekhniki. 2006. No. 1 (37). P. 29–34. (In Russian).
6. Kulikova N. A., Titorenko O. N., Tyapkina V. A. Resistive Grounding of the Neutral Is a Way to Increase the Reliability of 6–35 kV Electrical Networks // Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2018. Vol. 4, No. 2. P. 32–38. (In Russian).
7. Fishman V. Regulirovanie rezhima zazemleniia neutrali v setiakh 6–35 kV s ispolzovaniem printsipov Smart Grid // Novosti elektrotekhniki. 2012. No. 5. P. 42–47. (In Russian).
8. Tselebrovsky Yu. V. Oblasti primeneniia razlichnykh sistem zazemleniia neutrali // Novosti elektrotekhniki. 2008. No. 4 (52). P. 21–24. (In Russian).

Информация об авторах

Л. В. Владимиров – кандидат технических наук.

Г. В. Иванов – кандидат технических наук, доцент.

Е. Ю. Кислицин – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

L. V. Vladimirov – Candidate of Sciences (Engineering).

G. V. Ivanov – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor.

E. Yu. Kislitsin – Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor.