

УСТРОЙСТВО ОТБОРА МОЩНОСТИ ИЗ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
г. Якутск, Россия*

Для отбора мощности из полуволновой электропередачи предлагается использование устройства, которое стабилизирует напряжение у нагрузки при изменении её мощности от нуля до максимального значения. При отборе мощности из полуволновой электропередачи режим напряжения в промежуточной системе отбора мощности должен соответствовать допустимым пределам и не оказывать влияния на режим передачи натуральной мощности по линии. С целью регулирования напряжения в линии предлагается использовать линейный регулятор-стабилизатор напряжения – тиристорный стабилизатор параметров в месте отбора мощности из полуволновой электропередачи. При этом для регулирования используется способ встречного регулирования напряжения в функции тока нагрузки, которая позволяет следить за изменением тока нагрузки с помощью трансформаторов тока, включенных в магистральную линию и линию отбора мощности.

Ключевые слова: полуволновая линия электропередачи, отбор мощности, тиристорный стабилизатор параметров.

Введение

Для передачи электрической энергии на дальние и сверхдальние расстояния перспективными являются полуволновые и настроенные на полуволну линии электропередачи [1–12]. В ходе комплексных испытаний, проведенных в 1967 г., доказана их работоспособность и эффективность в качестве транзитных, но для расширения ее эксплуатационных возможностей, а также для взаимного обмена энергией между системами, подключаемыми к магистральной полуволновой электропередаче, требуется решить задачу отбора мощности из линий данного типа. Основной проблемой для отбора мощности из полуволновой линии электропередачи являются значительные колебания напряжения вдоль линии при изменении передаваемой мощности [10–16, 20]. Поэтому для отбора мощности из полуволновой электропередачи предлагается использование устройства, которое стабилизирует напряжение у нагрузки при изменении её мощности от нуля до максимального значения. При отборе мощности из полуволновой электропередачи режим напряжения, в промежуточной системе отбора мощности должен соответствовать допустимым пределам и не оказывать влияния на режим передачи натуральной мощности по линии [15, 17–20]. Данная цель достигается тем, что отбор мощности в средней части магистральной полуволновой линии (ПЭП), содержащей трансформатор, первичная обмотка которого присоединена последовательно в разомкнутую в месте присоединения линию, вторичная обмотка присоединена параллельно к нагрузке промежуточной системы, параллельно нагрузке в средней части линии промежуточного отбора присоединено автоматически регулируемое системой управления

реактивное сопротивление, изменяемое таким образом, что ток промежуточной нагрузки в первичной обмотке трансформатора не изменяется по величине. Таким образом, напряжение у нагрузки остается стабильным [18].

Принцип работы устройства отбора мощности

Устройство состоит из трансформатора 2, первичная обмотка которого присоединена последовательно в разомкнутую в месте присоединения линию 1. Вторичная обмотка трансформатора 2 присоединена к нагрузке 3, параллельно которой через трансформаторы тока 5, 6, устройство измерения угла фазового сдвига 7, систему управления 8 и блок силовых тиристоров 9 присоединено регулируемое реактивное сопротивление (индуктивное-емкостное) 4 (рис. 1).

Поскольку нагрузка 3 изменяется во времени, то её сопротивление тоже изменяется. При снижении нагрузки 3 её сопротивление увеличивается. При неизменном токе линии 3 и одновременном увеличении сопротивления нагрузки 3 увеличивается пропорционально напряжение на нагрузке 3, что может привести к недопустимым режимам. Для устранения этого недостатка параллельно нагрузке 3 присоединено автоматически регулируемое реактивное сопротивление 4, которое через трансформаторы тока 5, 6, устройство измерения угла фазового сдвига 7, систему управления 8 и блок силовых тиристоров 9 уменьшается таким образом, чтобы модуль параллельно присоединенных сопротивления нагрузки 3 и реактивного сопротивления 4 оставался постоянным; в этом случае напряжение на нагрузке остается стабильным.

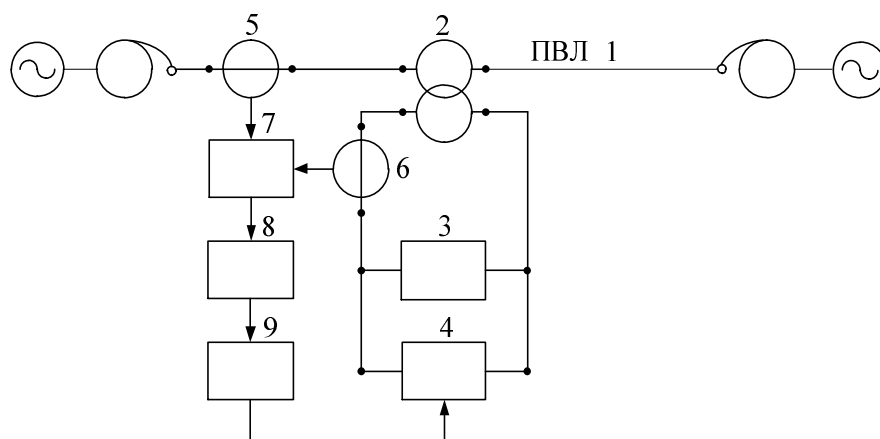


Рис. 1. Устройство отбора мощности из линии электропередачи

Структура тиристорного стабилизатора параметров

На рис. 2 представлена развернутая структурная схема разработанного унифицированного тиристорного стабилизатора параметров (ТСП) с противоаварийной защитой для осуществления отбора мощности из ПЭП и стабилизации напряжения и $\cos(\varphi)$ на подстанции промежуточного отбора мощности.

ТСП структурно состоит из входных измерительных трансформаторов тока ТТ1 12 и ТТ2 9, системы управления (СУ) 8 с измерителем фазового сдвига (ИФ) 11 и окончных силовых каналов: для стабилизатора напряжения – регулировочного трансформатора (РТ) 7 с четырехсекционной вторичной обмоткой, блока силовых тиристоров 6, вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) 3 и для стабилизатора коэффициента мощности – блока

тиристорного возбуждения 13, синхронного компенсатора 14 (см. рис. 2).

ВДТ присоединен к ПЭП параллельно и последовательно с линией отбора. Промежуточная система с нагрузками 4, 5 присоединена через трансформатор связи (ТС) 15.

Метод стабилизации параметров на промежуточной подстанции

С целью регулирования напряжения в линии изменяют поток реактивной мощности с помощью генераторов, компенсирующих устройств или добавочных трансформаторов. Известно также, что зависимость изменения реактивной мощности от напряжения имеет нелинейный характер. По этой причине для получения сигнала управления по напряжению необходимо наличие телеизмерительного канала. Это усложняет систему управле-

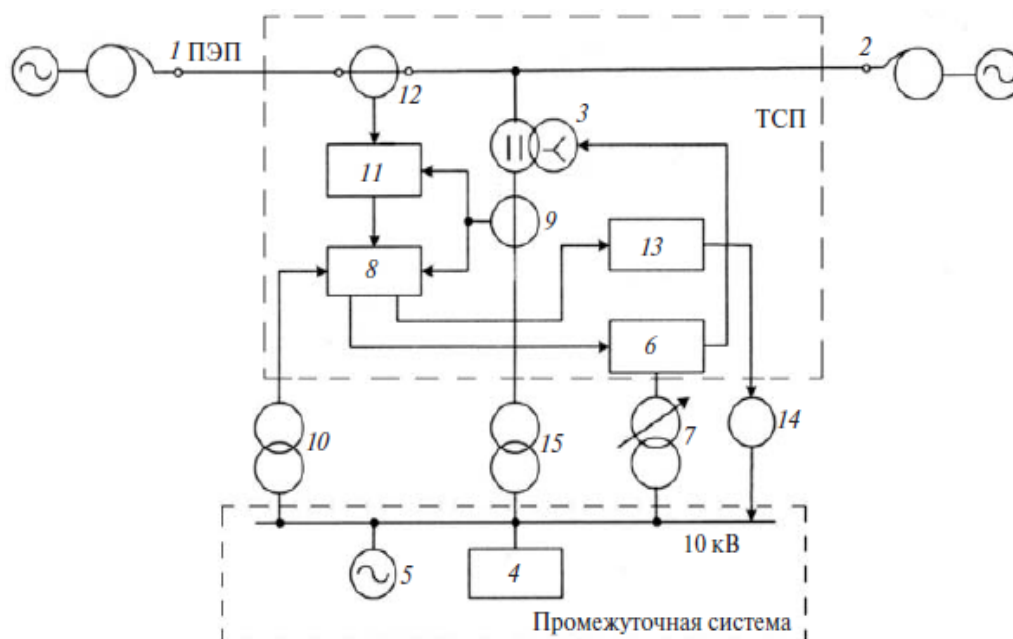


Рис. 2. Структурная схема унифицированного ТСП для промежуточного отбора мощности из ПЭП и стабилизации параметров на промежуточной подстанции

ния и делает дороже устройство регулирования и стабилизации напряжения. Поскольку главное назначение ТСП – работа в качестве линейного регулятора-стабилизатора напряжения в месте отбора мощности из ПЭП, в данной ситуации наиболее правильным и простым решением в получении информации является контроль за изменением тока нагрузки. На этом принципе и базируется метод встречного регулирования напряжения, описанный в работе [20].

Синхронный компенсатор, размещенный на подстанции промежуточного отбора мощности, компенсирует реактивную составляющую нагрузки и стабилизирует коэффициент мощности. На рис. 3 представлены диаграммы стабилизации коэффициента мощности промежуточного отбора.

Напряжение на шинах промежуточной подстанции $U_{\text{ш}}$, к которым присоединен СК (рис. 3а), уравнивается ЭДС компенсатора $E_{\text{СК}}$, и ток $I_{\text{СК}}$ в обмотке якоря равен нулю (рис. 3б).

В случае, когда ток $I_{\text{СК}}$ опережает напряжение $U_{\text{ш}}$ (режим перевозбуждения) (рис. 3в), компенсатор выдает в сеть реактивную мощность, а в режиме недовозбуждения $U_{\text{ш}} > E_{\text{СК}}$, реактивный ток отстает от напряжения $U_{\text{ш}}$ и СК потребляет из сети реактивную мощность (рис. 3г).

Эффективная стабилизация коэффициента мощности промежуточного отбора возможна только при наличии системы сильного возбуждения СК, обеспечивающей высокую скорость нарастания тока возбуждения на зажимах основной и дополнительной обмоток ротора реверсивного синхронного компенсатора.

Изменение напряжения на нагрузке подстанции промежуточного отбора вызывает пропорциональное изменение тока. В системе управления стабилизатор напряжения совместно с коммутатором, в зависимости от знака и угла фазового сдвига тока нагрузки, формируют алгоритм переключения обмоток секций регулировочного трансформатора для изменения коэффициента трансформации ВДТ блоком силовых тиристоров. Тем самым, система управления стабилизирует напряжение, регулируя режимы добавки и отбавки ВДТ.

Алгоритм работы тиристорного стабилизатора параметров

Изменение напряжения линии (см. рис. 2), например на 5 % в сторону понижения, увеличивает соответственно ток в трансформаторах тока ТТ1 и ТТ2. Вторичная обмотка трансформатора тока ТТ2 нагружена одним входом электронной системы

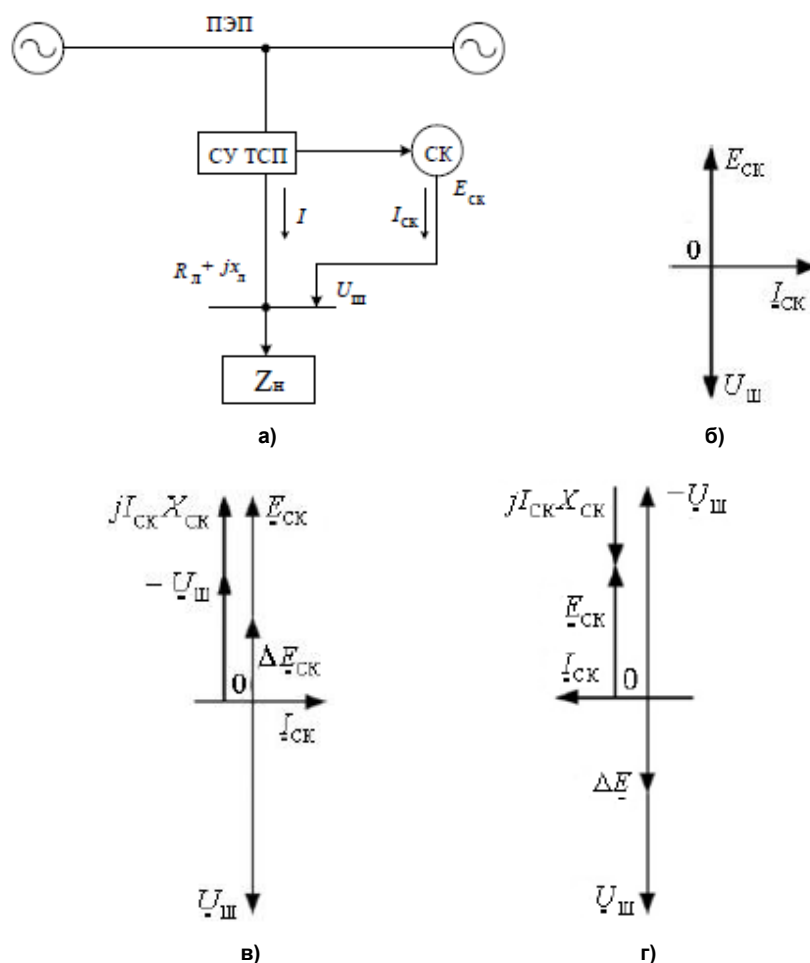


Рис. 3. Диаграммы стабилизации коэффициента мощности

управления (СУ) и вторым входом устройства измерения угла фазового сдвига (ИФ) [20].

Вторичный ток трансформатора ТТ2 преобразуется электронной системой управления (СУ) в сигнал управления комбинацией ключей блока силовых тиристорных (БСТ), через которые присоединяется регулируемая вторичная обмотка трансформатора РТ к вторичной обмотке трансформатора вольтодобавочного канала (ВДТ) для стабилизации напряжения через трансформатор связи (ТС) у нагрузок Z_H промежуточной системы [20].

Стабилизация реактивных параметров у нагрузок Z_H осуществляется путем сравнения входящих токов от трансформаторов ТТ2 и ТТ1 устройством измерения угла фазового сдвига (ИФ), которое подает сигнал управления через электронную систему управления (СУ) и блок тиристорного возбуждения (БТВ) в систему возбуждения синхронного компенсатора (СК) для балансировки режима реактивной мощности нагрузок с режимом магистральной полуволновой линии 1–2, обеспечивая при этом ей режим устойчивой передачи натуральной мощности [20].

Заключение

Для взаимного обмена энергией между магистральной полуволновой линией электропередачи и подключаемыми к ней системами предлагается использовать разработанное устройство – тиристорный стабилизатор параметров. При отборе мощности из полуволновой электропередачи режим напряжения в промежуточной системе отбора мощности должен соответствовать допустимым пределам и не оказывать влияния на режим передачи натуральной мощности по линии. Предлагаемое устройство при изменении передаваемой мощности в значительных пределах стабилизирует напряжения у нагрузки и обеспечивает нормальное функционирование самой линии и подключаемых к ней систем.

Литература

1. Hubert, F.J. *Half-Wavelength Power Transmission Lines* / F.J. Hubert, M.R. Gent // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1965. – Vol. 84. – P. 965–974. DOI: 10.1109/tpas.1965.4766125
2. Prabhakara, F.S. *Performance of Tuned Half-Wave-Length Power Transmission Lines* / F.S. Prabhakara, K. Parthasarathy, H.N.R. Rao // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1969. – Vol. PAS-88. – P. 1795–1802. DOI: 10.1109/tpas.1969.292295
3. Wang, G. *Research status and prospects of the half-wavelength transmission lines* / G. Wang, Q. Li, L. Zhang // *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. – 2000.
4. *A study and design of half-wavelength lines as an option for long distance power transmission* / M.L. Santos, J.A. Jardini, M. Masuda, G.L.C. Nicola //

IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society. – 2011. DOI: 10.1109/ptc.2011.6019235

5. *Reliability and economic analysis of UHV Half-Wave-length AC transmission* / Y. Song, B. Fan, Y. Bai et al. // *IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON*. – 2012. DOI: 10.1109/powercon.2012.6401413

6. *Route construction analysis and overvoltage characteristics of true type half wavelength AC transmission line test* / P. Gu, P. Wang, B. Han et al. // *Dianli Jianshe/Electric Power Construction*. – 2018. – Vol. 39. – P. 101–107.

7. *Study on the current differential protection for half-wave-length AC transmission lines* / L. Tang, X. Dong, B. Wang, S. Shi // *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. – 2018. DOI: 10.1109/pesgm.2017.8273851

8. Tavares, M.C. *Half-wave length line energization case test – proposition of a real test* / M.C. Tavares, C.M. Portela // *International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE*. – 2008. DOI: 10.1109/ichve.2008.4773923

9. Iliceto, F. *Analysis of half-wave length transmission lines with simulation of corona losses* / F. Iliceto, E. Cinieri // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1988. – Vol. 3. – P. 2081–2091. DOI: 10.1109/61.194020

10. Самородов, Г.И. *Оптимизация схем и параметров дальних и сверхдальних электропередач переменного тока: автореф. дис. ... д-ра техн. наук* / Г.И. Самородов. – Новосибирск, 1990. – 32 с.

11. Самородов, Г.И. *Сверхдальние электропередачи* / Г.И. Самородов – Новосибирск, 1994. – 112 с.

12. Зильберман, С.М. *Методические и практические вопросы полуволновой технологии передачи электроэнергии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук* / С.М. Зильберман. – Красноярск, 2009. – 39 с.

13. *Распределение параметров вдоль полуволновой электропередачи и её пропускная способность, в составе объединения «ЕНЭС Востока России»* / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, Г.И. Давыдови и др. // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 4-5. – С. 872–875.

14. *Применение полуволновых технологий для повышения пропускной способности межсистемных и межрегиональных линий электропередач* / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, П.Ф. Васильев и др. // *Труды VII евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата*. – СПб., 2014. – С. 467–471.

15. *Разработка научно-методологического сопровождения реализации энергетической стратегии региона Севера с учетом топливно-энергетического комплекса и магистральных линий электропередачи развития ЕНЭС на Востоке России* / В.П. Кобылин, В.А. Седалищев, Р.П. Лу-

Фир-Су и др. – Якутск: Институт физико-технических проблем Севера, 2013. – 96 с. – Деп. в ВИНТИ, № 249-В2013 от 27.08.2013.

16. Кобылин, В.П. Повышение эксплуатационной надежности электросетевого хозяйства на Севере / В.П. Кобылин – Новосибирск: Наука, 2006. – 223 с.

17. Хоютанов, А.М. Повышение надежности и эффективности сверхдальних межсистемных связей / А.М. Хоютанов, П.Ф. Васильев, В.П. Кобылин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 67–75. DOI: 10.14529/power170308

18. Пат. 2559024 Российская Федерация. Устройство отбора мощности из линии электропередачи / А.М. Хоютанов, Р.П. Ли-Фир-Су,

В.П. Кобылин, А.В. Кобылин; заявитель и патентообладатель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН. – № 2014117828/07; заявл. 29.04.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. – 5 с.

19. Пат. 2607649 Российская Федерация. Способ отбора мощности из полуволновой электропередачи в «электрическом центре» / А.М. Хоютанов, Р.П. Ли-Фир-Су, В.П. Кобылин, А.В. Кобылин; заявитель и патентообладатель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН. – № 2015126971, заявл. 02.07.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 7 с.

20. Промежуточный отбор мощности из полуволновой электропередачи / А.В. Кобылин, Г.И. Самородов, С.М. Зильберман и др. // Электричество. – 2015. – № 6. – С. 4–11.

Хоютанов Александр Михайлович, ведущий инженер отдела электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск; shuriklater@mail.ru.

Кобылин Виталий Петрович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск; ee.iftps@yandex.ru.

Васильев Павел Филиппович, канд. техн. наук, заведующий отделом электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск; kb-8@mail.ru.

Давыдов Геннадий Иванович, научный сотрудник отдела электроэнергетики, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск; dav_gen@mail.ru.

Поступила в редакцию 31 июля 2019 г.

DOI: 10.14529/power190307

POWER TAKEOFF FROM A TRANSMISSION LINE: A SPECIAL UNIT

A.M. Khoiutanov, shuriklater@mail.ru,

V.P. Kobylin, ee.iftps@yandex.ru,

P.F. Vasilyev, kb-8@mail.ru,

G.I. Davydov, dav_gen@mail.ru

*V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS,
Yakutsk, Russian Federation*

The paper proposes a device that stabilizes the load voltage when the load power changes from zero to max.; the intended use is power takeoff from a half-wave transmission. When taking power, the voltage in the intermediate power takeoff system must match the acceptable limits and should not affect the transmission of natural power through the line. To stabilize voltage in a line, the paper proposes a thyristor-based stabilizer to be placed where power is being taken off from a half-wave power transmission. Counterload voltage control as a function of the load-current is proposed to control the voltage, as it can track the load current by means of the transformers connected to the mainline and to the power takeoff line.

Keywords: half-wave power transmission line, power takeoff, thyristor parameter stabilizer.

References

1. Hubert F.J., Gent M.R. Half-Wavelength Power Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1965, vol. 84, pp. 965–974. DOI: 10.1109/tpas.1965.4766125
2. Prabhakara F.S., Parthasarathy K., Rao H.N.R. Performance of Tuned Half-Wave-Length Power Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, vol. PAS-88, pp. 1795–1802. DOI: 10.1109/tpas.1969.292295
3. Wang G., Li Q., Zhang L. Research Status and Prospects of the Half-Wavelength Transmission Lines. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2000.
4. Santos M.L., Jardini J.A., Masuda M., Nicola G.L.C. A Study and Design of Half-Wavelength Lines as an option for long distance power transmission. *IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society*, 2011. DOI: 10.1109/ptc.2011.6019235
5. Song Y., Fan B., Bai Y., Qin X., Zhang Z. Reliability and Economic Analysis of UHV Half-Wave-Length AC Transmission. *IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON*, 2012. DOI: 10.1109/powercon.2012.6401413
6. Gu P., Wang P., Han B., Xiang Z., Ban L., Zhao H., Jiao C. Route Construction Analysis and Overvoltage Characteristics of True Type Half Wavelength AC Transmission Line Test. *Dianli Jianshe/Electric Power Construction*, 2018, vol. 39, pp. 101–107.
7. Tang L., Dong X., Wang B., Shi S. Study on the Current Differential Protection for Half-Wave-Length AC Transmission Lines. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2018. DOI: 10.1109/pesgm.2017.8273851
8. Tavares M.C., Portela C.M. Half-Wave Length Line Energization Case Test – Proposition of a Real Test. *International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE*, 2008. DOI: 10.1109/ichve.2008.4773923
9. Iliceto F., Cinieri E. Analysis of Half-Wave Length Transmission Lines with Simulation of Corona Losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1988, vol. 3, pp. 2081–2091. DOI: 10.1109/61.194020
10. Samorodov G.I. *Optimizatsiya skhem i parametrov dal'nikh i sverkhdal'nikh elektropredach peremennogo toka: avtoref. dokt. diss.* [Optimization of Circuits and Parameters of Long-Distance and Ultra-Long Alternating Current Transmissions. Abstract of doct. diss.]. Novosibirsk, 1990. 32 p.
11. Samorodov G.I. *Sverkhdal'nie elektropredachi poluvolnovogo tipa* [Ultra-Long Power Transmission of a Half-Wave Type]. Novosibirsk, Science Publ., 2003. 177 p.
12. Zil'berman S.M. *Metodicheskie i prakticheskie voprosy poluvolnovoy tekhnologii peredachi elektroenergii: avtoref. dokt. diss.* [Methodical and Practical Questions of Half-Wave Technology of Electric Power Transmission. Abstract of doct. diss.]. Krasnoyarsk, 2009. 39 p.
13. Khoyutanov A.M., Kobylin V.P., Davydov G.I., Nesterov A.S., Vasil'ev P.F. [Distribution of Parameters Along Half-Wave Electricity Transmission and Its Capacity as Part of Association “ENES of the East of Russia”]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Magazine of Applied and Basic Researches], 2016, no. 4-5, pp. 872–875. (in Russ.)
14. Khoyutanov A.M., Kobylin V.P., Vasil'ev P.F., Davydov G.I., Nesterov A.S. [Application of Half-Wave Technologies to Increase Capacity of Inter-System and Inter-Regional Power Lines]. *Trudy VII evraziyskogo simpoziuma po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata* [Proceedings of the VII Eurasian Symposium on Strength Problems of Materials and Machines for Cold-Climate Regions]. St. Petersburg, 2014, pp. 467–471. (in Russ.)
15. Kobylin V.P., Sedalishchev V.A., Li-Fir-Su R.P., Khoyutanov A.M., et al. [Development of Scientific and Methodological Support for Implementation of Energy Strategy of the North Region Taking into Account Fuel and Energy Complex and Main Transmission Lines of the UNEG Development in the East of Russia]. Institute of Physical and Technical Problems of the North, Yakutsk, 2013, 96 p. (in Russ.)
16. Kobylin V.P. *Povyshenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti elektrosetevogo khozyaystva na Severe* [Improving the Reliability and Efficiency of Ultra-Long Interconnects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006. 223 p.
17. Khoiutanov A.M., Vasilyev P.F., Kobylin V.P. Increasing of Reliability and Efficiency of Long-Distance Intersystems Communications. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 67–75. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170308
18. Khoyutanov A.M., Li-Fir-Su R.P., Kobylin V.P., Kobylin A.V. *Ustroystvo otbora moshchnosti iz linii elektropredachi* [Power Take-Off from Power Transmission Line]. Patent RF, no. 2559024, 2014.
19. Khoyutanov A.M., Li-Fir-Su R.P., Kobylin V.P., Kobylin A.V. *Sposob otbora moshchnosti iz poluvolnovoy elektropredachi v “elektricheskom tsentre”* [Method of Power Take-Off from Half-Wave Power Transmission in “Electrical Center”]. Patent RF, no. 2607649, 2015.

20. Kobylin A.V., Samorodov G.I., Zil'berman S.M., Kobylin V.P., Khoiutanov A.M. *Provezhutochnyy otbor moshchnosti iz poluvolnovoy elektropredachi* [Intermediate Power Take-Off from Half-Wave Power Transmission]. *Electrical Technology Russia*, 2015, no. 6, pp. 4–11.

Received 31 July 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Устройство отбора мощности из линии электропередачи / А.М. Хоютанов, В.П. Кобылин, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 65–71. DOI: 10.14529/power190307

FOR CITATION

Khoiutanov A.M., Kobylin V.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I. Power Takeoff from a Transmission Line: a Special Unit. *Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 65–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190307